Numero 332
Aprile 1996
Anno XXIX
Volume LVI

I dieci anni dell'«era Chernobyl»

Le conseguenze ambientali e sanitarie del più grave incidente mai occorso a una centrale nucleare persisteranno per generazioni

di Jurij M. Ščerbak

Grochowiak/Kepli CZ Sygma

«Sembrava la fine del mondo... Non potevo credere ai miei occhi quando vidi il reattore distrutto dall'esplosione. Ero il primo uomo al mondo a vedere una cosa simile. Come ingegnere nucleare, compresi subito tutte le conseguenze di quanto era accaduto: era un inferno nucleare. Fui colto dal terrore.»

Queste parole sono parte di una lettera scrittami nel 1986 dal responsabile di turno del reattore esploso nella centrale nucleare di Chernobyl, nell'Ucraina settentrionale. L'esplosione e il successivo incendio portarono alla dispersione di detriti radioattivi su gran parte dell'Europa orientale. L'autore delle parole sopra riportate fu poi arrestato insieme con diverse altre persone per il suo presunto ruolo nel disastro, anche se non ammise mai alcuna colpa.

In seguito l'inchiesta ufficiale stabilì che le responsabilità di questa terribile tragedia si estendevano ben al di là di chi era in servizio all'impianto nella notte del 25 aprile 1986 e nel primo mattino del 26 aprile. Analogamente, le conseguenze del disastro si sono estese ben oltre il settore della produzione di energia nucleare per sollevare questioni di importanza fondamentale per una civiltà tecnologica. Prima dell'esplosione, Chernobyl era una cittadina pressoché ignota al resto del mondo. Da allora il suo nome è entrato nella storia del XX secolo a indicare il più grave disastro ambientale di origine tecnologica che sia mai avvenuto, ed è diventato sinonimo di catastrofe quanto «Stalingrado» o «Bhopal». Anzi, le ripercussioni politiche di Chernobyl hanno certamente contribuito ad accelerare il crollo dell'Unione Sovietica.

Date le conseguenze della catastrofe per tutta l'umanità, è fondamentale che il mondo ne comprenda sia le ragioni sia le conseguenze. Gli eventi che condussero all'esplosione sono ben noti. Il reattore numero quattro, un RBMK-1000 da mille megawatt, produceva vapore che alimentava i generatori elettrici. Nella notte dell'incidente, gli operatori stavano effettuando una prova per stabilire quanto a lungo i generatori potessero funzionare senza essere alimentati; a questo scopo, essi ridussero notevolmente l'erogazione di potenza del reattore e bloccarono il flusso di vapore verso i generatori.

Purtroppo il reattore RBMK-1000 ha un difetto progettuale che ne rende instabile il funzionamento a bassa potenza. In queste condizioni un aumento spurio della produzione di vapore può incrementare notevolmente la velocità di produzione di energia del reattore. Se questa energia addizionale genera altro vapore, si può avere come risultato un picco di potenza incontrollato. Come se ciò non bastasse, quella notte gli operatori avevano disinserito i sistemi di sicurezza che avrebbero potuto evitare la distruzione del reattore perché temevano che interferissero con la prova in corso.

Alla 1.23 e 40 secondi del 26 aprile, riconoscendo tardivamente che la situazione era ormai allarmante, un operatore premette un pulsante che attivava il sistema di protezione automatico. Questa azione avrebbe dovuto far spegnere il reattore, ma era troppo tardi. Ciò che accadde può essere paragonato all'azione di premere il freno per far rallentare un'automobile e scoprire che, invece, il veicolo accelera incontrollabilmente.

In tre secondi, la produzione di energia nel nocciolo del reattore era salita a 100 volte il livello massimo normale e la temperatura era aumentata drasticamente. Due esplosioni sfondarono la lastra di metallo da 2000 tonnellate che sigillava la sommità del reattore, distruggendo l'edificio che lo ospitava. Nonostante i tentativi di domare l'incendio, le centinaia di tonnellate di grafite che facevano da moderatore continuarono a bruciare per 10 giorni. La colonna di gas roventi che si innalzava dal reattore portò nell'ambiente un aerosol di combustibile e prodotti di fissione. Il combustibile consisteva principalmente di uranio mescolato a una certa quantità di plutonio, sottoprodotto del normale funzionamento del reattore. Il plutonio è l'elemento più tossico che si conosca, e alcuni dei prodotti di fissione erano assai più radioattivi dell'uranio e del plutonio: fra i più pericolosi vi erano lo iodio 131, lo stronzio 90 e il cesio 137.

Un pennacchio contenente questi radioisotopi si spostò, trasportato dai venti, verso nord e ovest, depositando particelle radioattive su aree situate a migliaia di chilometri di distanza. Le regioni colpite comprendevano, oltre all'Ucraina stessa, Bielorussia, Russia, Georgia, Polonia, Svezia, Germania, Turchia e altre aree. Anche paesi distanti come Stati Uniti e Giappone ricevettero quantità misurabili di radiazione. In Polonia, Germania, Austria e Ungheria, oltre che in Ucraina, fu necessario distruggere prodotti agricoli e latte contaminati, mentre in Finlandia, Svezia e Norvegia si dovettero eliminare le carcasse di renne che erano morte per aver mangiato vegetazione contaminata.

Igor Kostin/Imago Sygma

«Zona proibita»: un agente di polizia ucraino controlla l'accesso a una città nel distretto di Narodiči, evacuato in seguito al pericoloso *fallout* radioattivo provocato dall'esplosione e dal successivo incendio nella vicina centrale di Chernobyl.

Non sarà mai possibile conoscere esattamente l'emissione totale di radioattività, ma la cifra ufficiale di 90 milioni di curie si deve considerare un valore minimo; secondo altre stime il totale potrebbe essere stato molte volte più alto. Si può dire senza tema di smentite che in termini di *fallout* radioattivo - anche se non, naturalmente, di effetti dovuti al calore e alle esplosioni - l'incidente fu paragonabile a un attacco nucleare di media entità. Subito dopo l'esplosione e l'incendio, 187 persone manifestarono avvelenamento acuto da radiazioni, e 31 di esse morirono; gran parte di queste prime vittime erano pompieri che tentavano di domare le fiamme.

Il reattore distrutto ha liberato radiazioni in quantità centinaia di volte superiori a quella prodotta dal bombardamento atomico di Hiroshima e Nagasaki. L'intensità della radiazione gamma nel sito della centrale ha superato i 100 roentgen per ora, livello corrispondente (in un'ora!) a una radiazione assorbita centinaia di volte superiore alla dose massima raccomandata *in un anno* dalla Commissione internazionale per la protezione radiologica. Sul tetto dell'edificio che conteneva il reattore distrutto la radiazione ha raggiunto il livello terrificante di 100 000 roentgen per ora.

Le dimensioni umane della tragedia sono vaste e raccapriccianti. All'epoca dell'incidente lavoravo come ricercatore medico presso l'Istituto di epidemiologia e malattie infettive di Kiev, a un centinaio di chilometri da Chernobyl. Il 26 aprile un amico mi disse che diverse persone erano state ricoverate negli ospedali della zona per ustioni subite in seguito a un incidente alla centrale, ma non avevamo un'idea precisa della gravità del fatto. Nei giorni successivi vennero divulgate poche notizie ufficiali, e quelle disponibili facevano pensare che il pericolo non fosse eccessivo. Le autorità cercarono di disturbare le trasmissioni radio provenienti dall'estero, anche se riuscimmo ad ascoltare una radio svedese che segnalava il rilevamento di alti livelli di radioattività in quel paese e altrove. Io e alcuni altri medici decidemmo di recarci sul luogo dell'incidente per osservare ciò che era accaduto e dare assistenza nei limiti del possibile.

Partimmo senza troppe preoccupazioni, ma, via via che ci avvicinavamo, cominciammo a vedere scene di panico. Coloro che godevano di una certa influenza erano riusciti a far partire i figli in aereo o in treno, ma chi non aveva conoscenze utili era costretto ad attendere

Vladimir Syomin

Una piccola paziente e sua madre attendono ansiosamente un esame della tiroide presso l'Istituto di endocrinologia di Kiev. Secondo le stime più recenti, nelle settimane immediatamente successive all'incidente di Chernobyl, circa 13 000 bambini avrebbero inalato aerosol contenenti elevati livelli di iodio 131, un isotopo radioattivo che si accumula nella tiroide. Da allora, l'incidenza di tumori della tiroide fra i bambini ucraini è aumentata di circa 10 volte.

in lunghe code per comprare i biglietti o talvolta a prendere d'assalto i treni per cercare la fuga. Molte famiglie erano state divise. In precedenza avevo assistito a uno sconvolgimento sociale paragonabile solo durante un'epidemia di colera. Già molti lavoratori della centrale erano stati ricoverati in ospedale.

La distribuzione del fallout radioattivo fu oltremodo irregolare. Una porzione di un campo poteva essere estremamente pericolosa, mentre a pochi metri di distanza i livelli di radioattività erano bassi. Vennero colpite aree immense. Sebbene lo iodio 131 abbia un tempo di dimezzamento di soli otto giorni, nelle settimane successive all'incidente questo isotopo fu causa di una massiccia emissione di radiazione. Lo stronzio 90 e il cesio 137, viceversa, sono più persistenti. Gli scienziati ritengono che a lungo termine il cesio sarà responsabile delle dosi più elevate di radiazione.

Nel complesso, più di 260 000 chilometri quadrati di territorio in Ucraina, Bielorussia e Russia presentano tuttora livelli di emissione da cesio 137 superiori a un curie per chilometro quadrato. Simili valori fanno sì che agli abitanti della zona si consigli di sottoporsi a controlli sanitari annuali per valutare gli effetti della radiazione. In Ucraina l'area con questo livello di contaminazione supera i 35 000 chilometri quadrati, ossia più del 5 per cento della superficie totale della nazione; la maggior parte - 26 000 chilometri quadrati - è terreno coltivabile. Nelle aree più gravemente colpite vi sono restrizioni sulle colture, ma i distretti meno contaminati sono tuttora sottoposti a sfruttamento agricolo.

Le zone gravemente contaminate dell'Ucraina comprendono 13 regioni amministrative (*oblast'*) dove sorgono 1300 città e villaggi, con una popolazione di 2,6 milioni di persone (tra cui 700 000 bambini). Entro 10 giorni circa dall'incidente, 135 000 persone che vivevano nelle aree più colpite avevano lasciato le loro abitazioni; oggi il totale è arrivato a 167 000. Tuttavia è chiaro che i tentativi fatti dalle autorità per coprire l'entità del disastro hanno inutilmente aggravato la situazione; se un numero maggiore di abitanti della regione fosse stato evacuato tempestivamente nei primi, cruciali giorni dopo l'esplosione, molte persone avrebbero potuto evitare di subire una dose di radiazione così elevata.

La regione in un raggio di 30 chilometri dalla centrale è oggi pressoché disabitata, e 60 insediamenti fuori di essa sono stati evacuati. Comunità un tempo animate sono città fantasma. Il Governo ha reagito a questa calamità senza precedenti emanando leggi che concedono uno statuto speciale alle aree contaminate e fornendo sussidi alle persone più gravemente provate; ciononostante le ripercussioni si faranno sentire per molte generazioni.

Le conseguenze sanitarie sono ovviamente le più gravi. Delle 400 000 persone che hanno lavorato come «liquidatori» per seppellire le scorie più pericolose e costruire lo speciale edificio che racchiude il reattore distrutto - conosciuto come «sarcofago» - circa 30 000 hanno accusato sintomi più o meno gravi; 5000 di essi sono ridotti a invalidi.

È difficile valutare, anche approssimativamente, quante persone siano già morte a causa dell'incidente. La popolazione della zona è stata notevolmente dispersa e i bambini sono stati allontanati da certe aree. Paragonando i dati di mortalità in diverse popolazioni prima e dopo l'incidente, la sezione ucraina dell'associazione ambientalista Greenpeace ha stimato un totale di 32 000 morti. Sono state fatte altre stime, sia più elevate sia più basse, ma ritengo che una cifra di questo ordine sia ragionevole. Alcune, forse molte, di queste morti potrebbero essere la conseguenza del terribile stress psicologico subito da coloro che vivono nelle regioni contaminate.

Uno studio clinico condotto su un ampio campione di liquidatori da un gruppo di ricerca di Kiev sotto la direzione di Sergej Komissarenko ha rivelato che gran parte degli individui esaminati soffriva di una costellazione di sintomi che nell'insieme sembrano definire una nuova sindrome clinica. I sintomi comprendono affaticamento, apatia e una riduzione del numero di linfociti *natural killer* nel sangue.

Le cellule natural killer hanno la capacità di uccidere le cellule tumorali e quelle infettate da virus; una riduzione del loro numero, quindi, deprime il sistema immunitario. Alcuni hanno definito questa sindrome «AIDS di Chernobyl». Oltre ad avere un rischio superiore alla norma di sviluppare leucemia e tumori maligni, le persone colpite sono suscettibili di forme particolarmente gravi di patologie cardiache, nonché di infezioni comuni come bronchiti, tonsilliti e polmoniti.

Per aver inalato aerosol contenenti iodio 131 immediatamente dopo l'incidente, 13 000 bambini che abitavano nella regione sono stati esposti a dosi di radiazione superiori a 200 roentgen equivalenti a livello della tiroide. (Ciò significa che hanno ricevuto almeno il doppio della dose massima raccomandata in un anno intero per i lavoratori dell'industria nucleare.) Forse 4000 di questi bambini sono stati esposti a dosi anche di 2000 roentgen equivalenti. Poiché lo iodio si accumula nella tiroide, le vittime hanno sviluppato infiammazione tiroidea cronica; di per sé l'infiammazione non dà sintomi, ma ha già cominciato a provocare molti casi di tumore della tiroide.

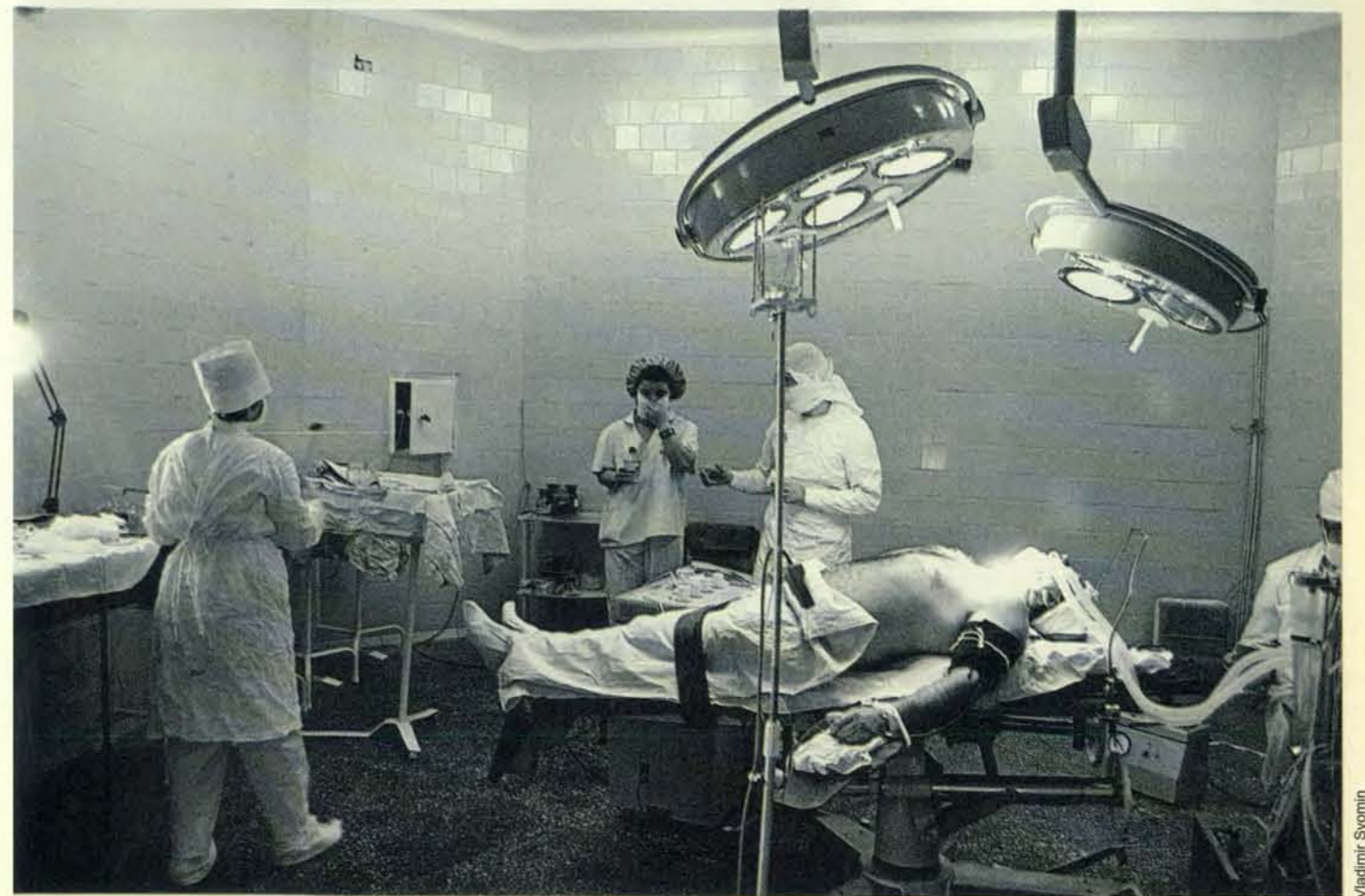
Le cifre parlano da sole. Dati raccolti da Mykola D. Tronko e colleghi, di Kiev, indicano che fra il 1981 e il 1985 - quindi prima dell'incidente - il numero di casi di cancro della tiroide in Ucraina era di circa 5 all'anno. Dopo cinque anni dal disastro la cifra era salita a 22 casi all'anno, e dal 1992 al 1995 si è avuta una media di 43 casi all'anno. Fra il 1986 e la fine del 1995 si sono registrati 589 casi di cancro della tiroide in bambini e adolescenti. (In Bielorussia il numero è ancora più alto.) In Ucraina l'incidenza del tumore della tiroide nei bambini è aumentata di 10 volte rispetto ai livelli precedenti al disastro, ed è superiore a quattro casi per milione. Il cancro della tiroide forma facilmente metastasi, anche se, qualora sia individuato precocemente, si può curare rimuovendo la ghiandola. Ai pazienti devono poi essere somministrati ormoni tiroidei come terapia di mantenimento per il resto della vita.

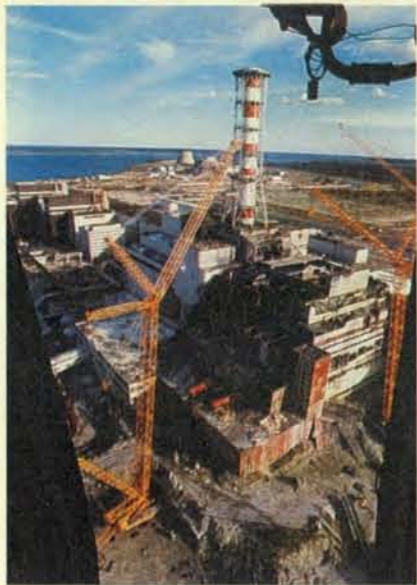
Ricerche condotte da scienziati ucraini e israeliani dimostrano che un terzo dei liquidatori - che erano prevalentemente uomini fra i trenta e i quarant'anni - è stato colpito da malattie dell'apparato riproduttivo, fra cui impotenza e anomalie degli spermatozoi. È stata anche notata una riduzione della capacità fecondante dello sperma. Si è avuto un aumento del numero di gravidanze con complicazioni nelle donne che vivono nelle aree contaminate, e molti adolescenti e giovani sono affetti da timore fobico della radiazione.

Gli ottimisti, che prevedevano conseguenze cliniche dell'esplosione trascurabili a lungo termine si sono dunque dimostrati clamorosamente in errore. Fra essi vi erano soprattutto le autorità sanitarie dell'ex Unione Sovietica che seguivano le direttive dell'ufficio politico del Comitato centrale del Partito comunista, ma anche numerosi specialisti di energia nucleare ed esperti militari occidentali.

È anche vero che le profezie dei «catastrofisti» - alcuni dei quali prevedevano più di 100 000 casi di cancro - non si sono avverate. Tuttavia l'esperienza degli effetti a lungo termine della radiazione - ricavata in gran parte dallo studio dei superstiti di Hiroshima e Nagasaki - fa pensare che il numero delle vittime continuerà a crescere nei prossimi anni. I tumori causati dalla radiazione possono richiedere molti anni per svilupparsi fino a divenire riconoscibili, cosicché le prospettive sanitarie a lungo termine per i bambini che vivono nelle zone fortemente contaminate purtroppo non sono buone.

La minimizzazione propagandistica, da parte delle autorità, dei pericoli legati alla radiazione ha prodotto in realtà effetti opposti a quelli voluti. Gli abitanti delle regioni colpite vivono in condizioni di costante stress, timorosi per la loro salute e per quella dei loro figli. Questo trauma mentale ha generato una sindrome psicologica paragonabile a quanto si osserva in veterani delle guerre in Vietnam e in Afghanistan. Fra i bambini evacuati dalla zona circostante la centrale si è osservato un aumento di 10-15 volte dell'incidenza di disturbi neuropsichiatrici.

La catastrofe e il conseguente esodo forzato di ampie popolazioni hanno anche provocato danni irreparabili alla ricca diversità etnica delle aree conta-

Vladimir Syomin

Nel tentativo di prevenire la formazione di metastasi, questo paziente viene sottoposto ad asportazione della tiroide presso la clinica oncologica dell'Istituto di endocrinologia di Kiev. L'intervento chirurgico è il solo trattamento possibile per il cancro della tiroide. Il paziente dovrà poi assumere ormoni tiroidei come terapia di mantenimento per il resto della sua vita.

Igor Kostin Sygma

Conti-S. Bukowski SIPA

Il reattore distrutto - il numero 4 della centrale di Chernobyl - fotografato dall'aereo poco tempo dopo il disastro (*a sinistra*). Un «sarcofago» di calcestruzzo e acciaio (*a destra*) è stato costruito in gran fretta per confinare i pericolosi radioisotopi, ma oggi si sta deteriorando a velocità allarmante. Un consorzio internazionale ha proposto di circondarlo con una struttura più robusta, ma la costruzione di quest'ultima costerebbe circa 300 milioni di dollari e richiederebbe cinque anni.

minate, e in particolare alla cultura dei cosiddetti *drevlyany* («gente dei boschi») e dei *poliščuk*, abitanti della regione della Polessia (la parte più depressa del bacino del Pripjat', oggi divisa fra Bielorussia e Ucraina). Il prezioso patrimonio architettonico e altri documenti della loro cultura spirituale e materiale sono andati in pratica perduti, dato che le città e i villaggi abbandonati sono in preda al degrado. Gran parte dello splendido ambiente naturale di questa zona è oggi inaccessibile per l'elevato livello di contaminazione.

Il Governo ucraino, che deve affrontare una grave crisi economica, è attualmente costretto a destinare circa il 10 per cento del suo bilancio a provvedimenti legati al disastro di Chernobyl. Questi fondi servono, fra l'altro, a fornire alloggi gratuiti ai circa tre milioni di persone (fra cui 356 000 liquidatori e 870 000 bambini) ufficialmente riconosciuti vittime della calamità. L'Ucraina ha introdotto una tassa specifica, pari al 12 per cento del reddito individuale, per raccogliere i fondi necessari, ma non si sa fino a quando il Governo potrà permettersi di mantenere i sussidi agli attuali livelli.

Oggi la zona di Chernobyl è uno dei luoghi più contaminati da radiazioni di tutto il mondo. Nei resti del reattore esploso vi sono decine di migliaia di tonnellate di combustibile nucleare, con un livello totale di radioattività di circa 20 milioni di curie. Il livello della radiazione all'interno del reattore stesso, ancora pari per il momento a diverse migliaia di roentgen, è letale per qualunque forma di vita. Ma il pericolo non è circoscritto: nella zona di 30 chilometri di diametro che circonda il reattore vi sono circa 800 siti di seppellimento preparati in tutta fretta, dove residui fortemente radioattivi (compresi alberi che avevano assorbito radioisotopi dall'atmosfera) sono stati semplicemente riversati in fosse rivestite di argilla.

Questi siti potrebbero essere responsabili della notevole contaminazione dei sedimenti del Dnepr e del suo tributario Pripjat', che forniscono acqua a 30 milioni di persone. Si stima che i sedimenti del Pripjat' nella zona adiacente a Chernobyl contengano stronzio 90 per 10 000 curie, cesio 137 per 12 000 curie e plutonio per 2000 curie. Allo scopo di impedire un'ulteriore contaminazione delle fonti d'acqua da parte di composti solubili, i materiali radioattivi sepolti devono essere trasportati in siti di immagazzinamento opportunamente progettati ed equipaggiati, siti che per ora non esistono.

Anche i due reattori ancora in funzione nella centrale (il terzo è stato disattivato dopo un incendio nel 1992) rappresentano un grave problema. Essi generano fino al 5 per cento dell'energia elettrica prodotta in Ucraina; il settore nucleare nel suo complesso produce il 40 per cento dell'energia del paese. Nonostante ciò, l'Ucraina e il G7 hanno firmato nel dicembre 1995 un accordo formale su un progetto di cooperazione per chiudere definitivamente l'intera centrale di Chernobyl entro il 2000. L'accordo prevede che Unione Europea e Stati Uniti aiutino l'Ucraina a mettere a punto piani per alleviare le conseguenze della chiusura della centrale sulla popolazione locale; vengono anche indicati meccanismi che consentano ai paesi partecipanti di accelerare i miglioramenti delle misure di sicurezza in uno dei reattori ancora in uso. Anche la chiusura dell'impianto si dovrà effettuare attraverso la cooperazione internazionale, così come l'operazione che pare più ardua: la costruzione di un edificio durevole ed ecologicamente sicuro che sostituisca il sarcofago eretto intorno alle rovine del reattore numero quattro.

Questa struttura, alta come un edificio di 10 piani, costruita principalmente in calcestruzzo e grandi lastre metalliche e con pareti spesse oltre sei metri, è stata progettata per durare 30 anni, ma è stata realizzata in gran fretta e in condizioni di elevata radioattività. Di conseguenza, il lavoro non è stato particolarmente accurato e oggi l'edificio ha bisogno di riparazioni immediate. Le parti metalliche sono arrugginite e il calcestruzzo presenta gravi fessurazioni su oltre 1000 metri quadrati di superficie; pioggia e neve filtrano all'interno. Se il sarcofago dovesse crollare - ipotesi tutt'altro che improbabile in caso di terremoto - dalle macerie si solleverebbe senza dubbio una grande quantità di polvere radioattiva.

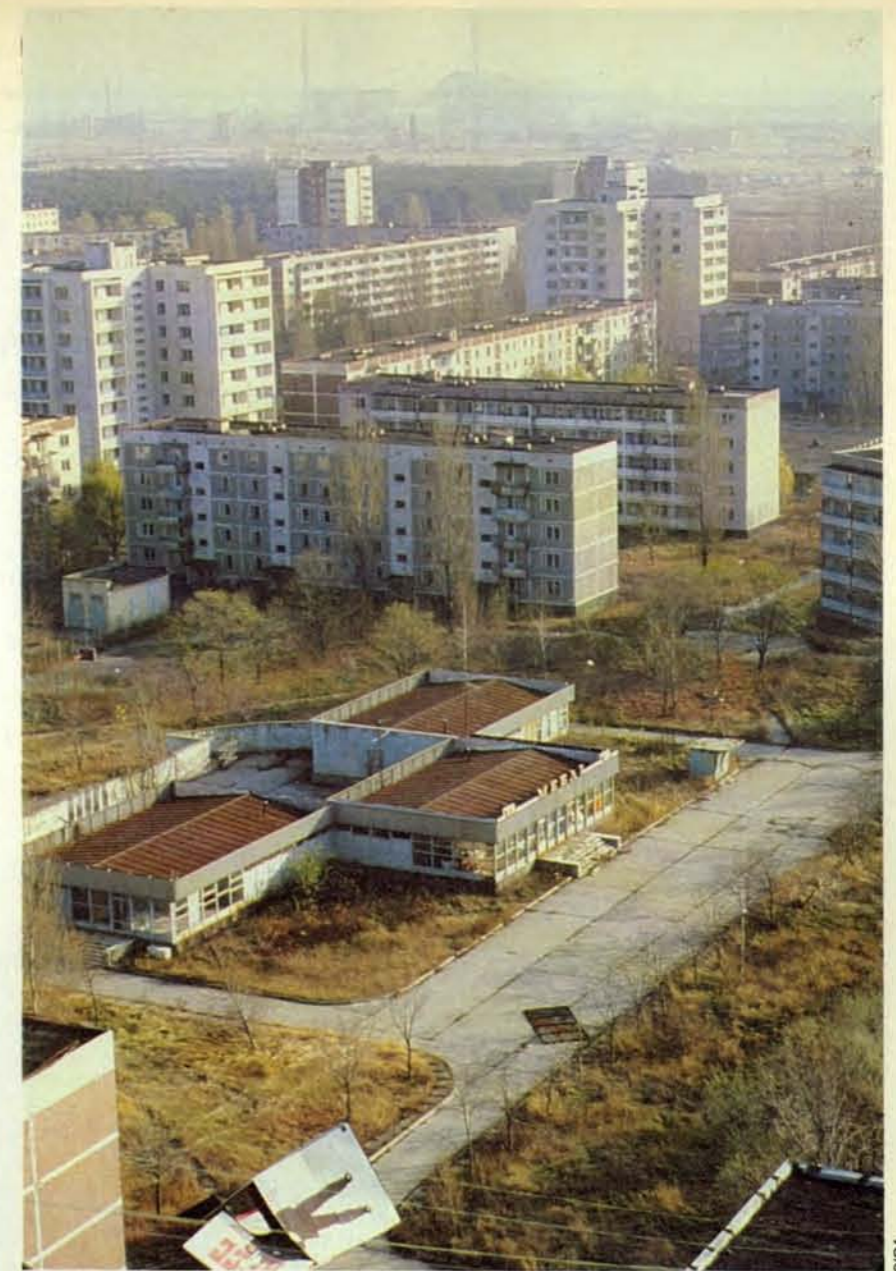
Nel 1993 si è tenuto un concorso internazionale per trovare la migliore soluzione a lungo termine. Sei progetti sono stati selezionati per una ulteriore valutazione (su 94 proposte iniziali) e l'anno successivo è stato prescelto il vincitore: Alliance, un consorzio guidato dalla società francese Campenon Bernard e comprendente imprese francesi, tedesche, britanniche, russe e ucraine. Il gruppo ha già condotto studi di fattibilità sulla proposta che ha presentato, che prevede la costruzione di un «supersarcofago» intorno a quello esistente. Se l'impresa verrà portata avanti, il lavoro di progettazione costerà da 20 a 30 milioni di dollari, mentre quello di costruzione - che durerà circa cinque anni - richiederà oltre 300 milioni di dollari. Per l'eliminazione definitiva dei resti dell'incidente occorreranno non meno di 30 anni; una possibilità attualmente in fase di studio è quella di inglobarli in vetro speciale.

Chernobyl non è stato semplicemente un disastro come altri che l'umanità ha sperimentato nella sua storia - incendi, terremoti, inondazioni - ma un evento del tutto nuovo, con ripercussioni sull'ambiente a livello globale. È caratterizzato da migliaia di «profughi ambientali»; da contaminazione a lungo termine di terra, acqua e aria; e forse da danni irreparabili agli ecosistemi. Chernobyl è una chiara dimostrazione della minaccia sempre crescente di una tecnologia incontrollata.

I progettisti dell'impianto, che non rispondeva alle norme di sicurezza internazionali, sono certamente colpevoli almeno quanto gli operatori. L'RBMK-1000 è un adattamento di un reattore militare destinato, in origine, a produrre materiale fissile per armi e non possiede una struttura di contenimento rinforzata per limitare gli effetti di un incidente. Il fatto che reattori di questo tipo siano tuttora in funzione in Ucraina, Lituania e Russia deve essere considerato un pericolo per il futuro.

Il disastro illustra chiaramente quale responsabilità ricada sulle spalle degli scienziati che fanno da consulenti ai politici riguardo a questioni tecniche. A mio parere, inoltre, anche il Governo dell'ex Unione Sovietica non è esente da colpe. Nonostante l'impegno dichiarato dall'allora presidente Mikhail S. Gorbaciov in favore della *glasnost'*, il regime fece ipocritamente quadrato subito dopo la tragedia nel tentativo futile, e in definitiva dannoso, di minimizzare l'enormità di quanto era accaduto.

Senza dubbio l'enfasi posta dalle autorità sovietiche sulla segretezza e sulla semplificazione delle misure di sicurezza per rendere la costruzione il più possibile economica si è rivelata fallimentare, in quanto ha portato a trascurare l'esperienza internazionale sulla sicurezza dei reattori. Più in generale, la calamità pone l'accento sul pericolo che le centrali nucleari rappresentano in regioni dove sono in corso attività belliche; e naturalmente, in tutto il mondo i reattori nucleari sono potenzialmente vulnerabili ad attacchi di terroristi.

Chernobyl ha insegnato al mondo intero una lezione terribile sulla necessità di essere attentamente preparati nel caso ci si voglia affidare alla tecnologia nucleare. In un certo senso l'umanità ha perduto l'innocenza il 26 aprile 1986; Chernobyl ha segnato l'inizio di una nuova era di cui dobbiamo ancora comprendere tutte le conseguenze.

SIPA

Una città fantasma, eredità dell'incidente di Chernobyl: un tempo Pripjat' era un vivace centro urbano di 45 000 abitanti che ospitava molti dei lavoratori della centrale. È stata evacuata poco dopo l'incidente ed è a tutt'oggi abbandonata.

JURIJ M. ŠČERBAK è l'ambasciatore ucraino negli Stati Uniti. Laureato in medicina nel 1958 all'Università di Kiev e specializzato poi in epidemiologia, ha pubblicato molti lavori nei campi dell'epidemiologia e della virologia, nonché poesie, opere teatrali e saggi. Nel 1988 ha fondato il Movimento verde ucraino, oggi Partito verde, di cui è stato leader. Nel 1989 è stato eletto al Soviet Supremo dell'Unione Sovietica, dove, militando nelle file dell'opposizione, è riuscito a ottenere l'apertura della prima inchiesta parlamentare sull'incidente di Chernobyl.

ŠČERBAK JURIJ, *Chernobyl: A Documentary Story*, St. Martin's Press, 1989.

EDWARDS MIKE, *Chernobyl: Living with the Monster* in «National Geographic», 186, n. 2, agosto 1994.

KOMISSARENKO SERGEI, *Radiazioni e immunità umana* (in russo), Naukova Dumka, Kiev, 1994.

WEINBERG ARMIN e altri, *Caring for Survivors of the Chernobyl Disaster: What the Clinician Should Know* in «Journal of the American Medical Association», 274, n. 5, 2 agosto 1995.

Povertà, alimentazione e sviluppo intellettivo

Una ricerca sulla nutrizione infantile rivela che, oltre alla dieta inadeguata, altri fattori legati alla povertà possono compromettere lo sviluppo fisico e psichico dei bambini

di J. Larry Brown ed Ernesto Pollitt

L'incidenza della malnutrizione tra i bambini è impressionante. Nel mondo circa 195 milioni di bambini di età inferiore a cinque anni hanno un'alimentazione inadeguata al loro fabbisogno. La malnutrizione è un fatto ben noto nei paesi in via di sviluppo, dove assume spesso la forma terribile di una vera e propria denutrizione: le immagini di corpi consunti dalla fame sono tragicamente familiari nelle zone colpite dalla carestia o lacerate dalla guerra. Tuttavia forme più moderate di malnutrizione sono ancora più comuni, specialmente nelle nazioni industrializzate: si stima che nel 1992 circa 12 milioni di bambini statunitensi abbiano avuto un'alimentazione decisamente insufficiente rispetto a quanto raccomandato dalla National Academy of Sciences.

Una nutrizione carente provoca nei bambini una serie di problemi di salute come estrema insufficienza ponderale, arresto della crescita, minore resistenza alle infezioni e, nei casi più gravi, morte prematura. Gli effetti possono essere particolarmente devastanti nei primissimi anni di vita, quando il corpo è in rapida crescita e vi è la massima richiesta di sostanze nutritive.

Un'alimentazione inadeguata può anche minare le capacità cognitive, seppure con meccanismi diversi da quanto si credesse in passato. Un tempo si pensava che la denutrizione in età infantile ritardasse lo sviluppo mentale unicamente producendo danni strutturali permanenti a livello cerebrale. Tuttavia uno studio recente indica che la malnutrizione può compromettere lo sviluppo intellettivo anche in altri modi. Fortunatamente, perfino nei casi in cui risultano danneggiati i tessuti cerebrali, alcune lesioni possono essere reversibili. Queste nuove scoperte hanno importanti implicazioni per le iniziative governative che possono essere prese per dare sostegno ai bambini più svantaggiati.

I primi studi sul legame tra malnutrizione e capacità mentali risalgono agli inizi del secolo, ma questo argomento non riuscì ad attrarre seriamente l'attenzione per molti decenni. Negli anni sessanta, il numero crescente di casi di nutrizione inadeguata osservato anche in paesi industrializzati come gli Stati Uniti nonché l'endemicità della malnutrizione nei paesi in via di sviluppo indussero molti ricercatori a esaminare gli effetti permanenti delle carenze alimentari. Numerosi studi effettuati in America Latina, Africa e Stati Uniti dimostrarono che i bambini che erano stati malnutriti conseguivano punteggi più bassi nei test di intelligenza rispetto ai bambini di pari condizione sociale ed economica che erano però stati nutriti correttamente. Questi studi presentavano limiti sperimentali in misura tale da non poter essere considerati conclusivi, ma ricerche successive hanno stabilito con certezza che la denutrizione nei primi anni di vita può condizionare negativamente nel lungo termine lo sviluppo intellettivo.

Per molti anni si è ritenuto che vi fosse una correlazione diretta tra nutrizione e sviluppo intellettivo. Si dava per certo che una dieta inadeguata producesse il danno peggiore nel periodo compreso tra il concepimento e l'età di due anni, vale a dire nell'intervallo di tempo in cui il cervello cresce fino a raggiungere circa l'80 per cento delle dimensioni del cervello dell'adulto. Si pensava che in questo periodo critico la denutrizione, anche moderata, pregiudicasse il normale sviluppo cerebrale, provocando un grave danno a lungo termine.

Si è dovuto però gradualmente riconoscere che il modello così delineato era troppo semplicistico. Per esempio, la convinzione che i primi due anni di vita fossero determinanti è risultata alquanto fuorviante. La crescita del cervello in quel periodo non sempre risulta irreversibilmente bloccata nei bambini denutriti. La si può invece considerare temporaneamente sospesa; se la dieta migliora intorno ai tre anni la crescita del cervello può continuare a una velocità quasi normale. Viceversa, un danno cerebrale può verificarsi anche se il bambino viene nutrito in maniera insufficiente *dopo* i primi due anni di vita; questo dimostra che, per un corretto sviluppo intellettivo, è importante che l'alimentazione sia adeguata per tutta la durata dell'infanzia.

Inoltre, sebbene una grave denutrizione durante l'infanzia possa certamente condurre a deficit intellettivi irreparabili, come è previsto dal modello tradizionale, non si può spiegare in modo soddisfacente con questa teoria il danno causato da una malnutrizione meno grave. Questa inadeguatezza si è fatta evidente negli anni sessanta, quando alcuni ricercatori dimostrarono che bambini leggermente denutriti provenienti da famiglie di reddito medio-alto (i cui deficit nutrizionali dipendevano quindi da condizioni patologiche) non soffrivano degli stessi disturbi dell'intelligenza manifestati da bambini leggermente denutriti appartenenti a classi povere. Se un'alimentazione inadeguata pregiudicasse l'attività cognitiva solo attraverso l'alterazione strutturale del cervello, i due gruppi avrebbero dovuto dare risultati simili. Doveva quindi entrare in causa qualche altro meccanismo. In altre parole, fattori come il reddito, l'istruzione e l'ambiente di vita potevano proteggere il bambino dagli effetti pericolosi di una dieta inadeguata, o viceversa potevano esacerbare il danno.

Una ricerca condotta negli anni settanta da David A. Levitsky e Richard H. Barnes, della Cornell University, ha contribuito a chiarire in che modo una nutrizione inadeguata potrebbe ostacolare lo sviluppo cognitivo anche con modalità diverse da quella del danno cerebrale irreversibile. Levitsky e

Steven Lehman, *SABA*

Garantendo una colazione sana ai bimbi in età scolare li si aiuta a evitare la malnutrizione e i problemi a essa correlati. Per un corretto sviluppo intellettivo del bambino è infatti essenziale soddisfare pienamente le sue necessità alimentari. In questa scuola materna di Central Falls nel Rhode Island è in corso un programma sovvenzionato dal National School Breakfast Program che controlla l'alimentazione dei bambini.

Gli effetti di povertà e malnutrizione: il Progetto guatemalteco

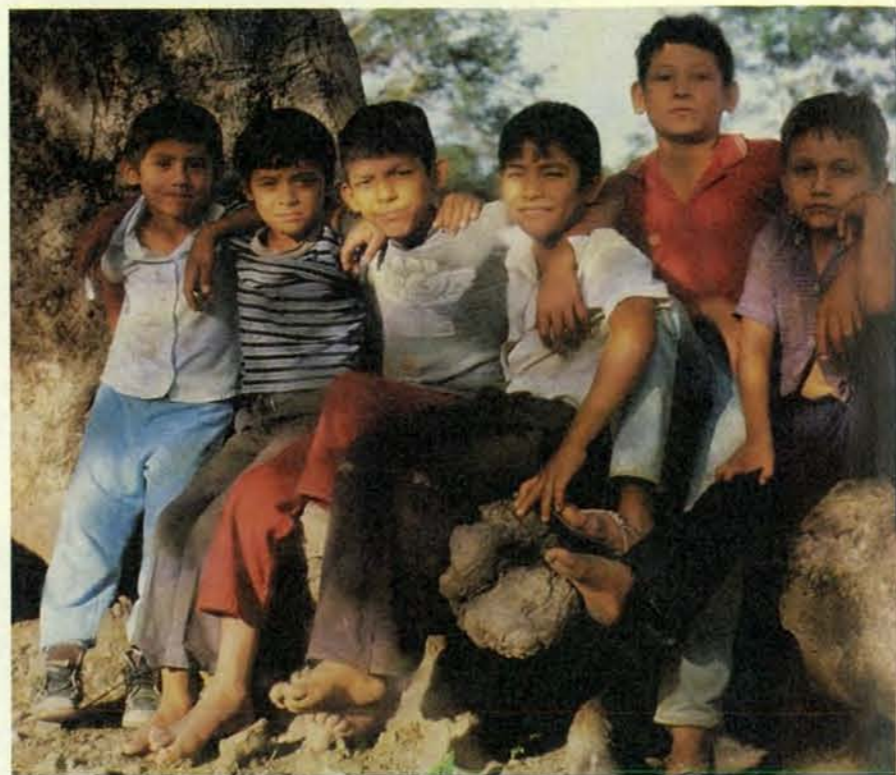
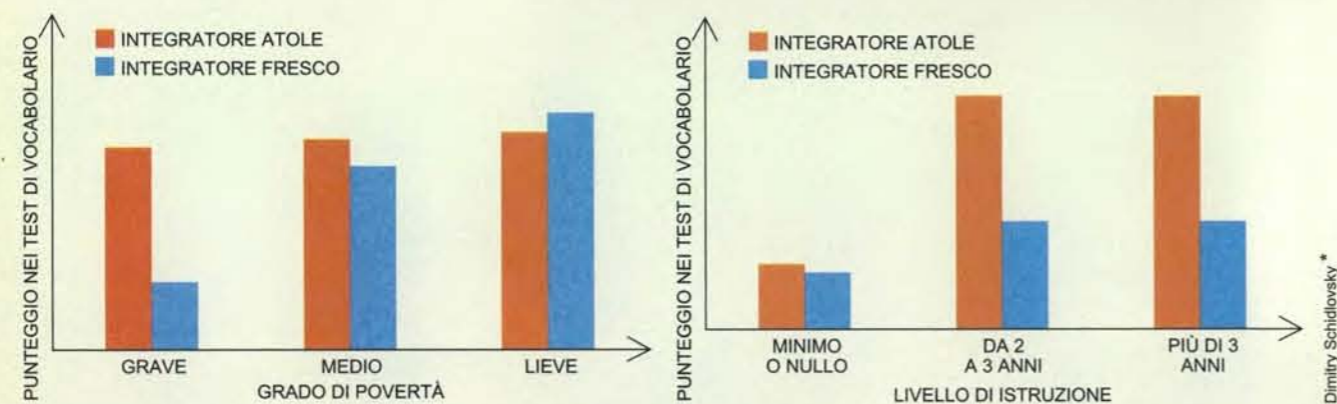
Un Progetto realizzato dall'Institute of Nutrition of Central America and Panama, si è proposto di studiare bambini e giovani adulti del Guatemala che avevano ricevuto integratori alimentari durante l'infanzia, per controllare in che modo la dieta nei primissimi anni di vita e la povertà incidano sul successivo sviluppo intellettivo. Ai soggetti partecipanti allo studio, tra cui i ragazzini qui a destra, è stata presentata una serie di test cognitivi. Quelli che prima dell'età di due anni avevano ricevuto con regolarità un integratore ad alto valore nutritivo chiamato Atole hanno ottenuto risultati di livello simile nella maggior parte dei test, come quelli di vocabolario, indipendentemente dalla condizione economica (*in basso a sinistra*). Viceversa i risultati ottenuti dai bambini che avevano ricevuto un integratore meno nutriente di nome Fresco variavano in base al grado di povertà. Evidentemente un'adeguata nutrizione nei primi anni di vita può aiutare a combattere gli effetti deleteri della povertà sullo sviluppo intellettivo. Tra i soggetti che hanno avuto più di due anni di istruzione regolare, coloro che hanno ricevuto l'integratore Atole hanno ottenuto punteggi significativamente più alti di quelli che hanno consumato Fresco (*in basso a destra*), e ciò indica che una dieta povera durante l'infanzia può effettivamente mettere a repentaglio l'apprendimento scolastico successivo.

Questo villaggio guatemalteco è uno dei quattro in cui bambini e donne in gravidanza hanno ricevuto integratori alimentari per verificare i benefici di una dieta adeguata sullo sviluppo cognitivo nell'infanzia.

Foto Margarita de Martinez, INCAP *

I test cognitivi utilizzati nel Progetto guatemalteco hanno verificato le capacità dei bambini partecipanti allo studio in campi diversi, come vocabolario, lettura e comprensione, conoscenze generali e aritmetica.

Barnes hanno effettuato studi sui roditori per identificare gli effetti della malnutrizione. Levitsky è giunto alla conclusione che gli animali malnutriti avevano prestazioni meno buone in test di capacità mentale, come orientarsi in un labirinto, non tanto perché soffrissero di un danno cerebrale ma piuttosto perché, mancando di energia, evitavano il contatto con i loro simili e gli oggetti dell'ambiente. Inoltre le madri tendevano a trattenere più a lungo i piccoli nel nido, ostacolandone ulteriormente la crescita e l'autonomia.

Per estrapolazione, i risultati di Levitsky e Barnes implicavano che le modeste capacità cognitive dei bambini denutriti potessero dipendere in parte da una ridotta interazione con altre persone e con l'ambiente circostante. Questo enorme progresso nella comprensione del fenomeno suscitò ottimismo per quanto riguardava le prospettive di recupero di questi bambini: se parzialmente responsabile del danno cognitivo era la ridotta interazione sociale, allora sarebbe forse stato possibile istituire forme di sostegno cognitivo e sociale per ovviare alle carenze.

Per quanto le nuove idee fossero estremamente interessanti, gli scienziati non disponevano di molti elementi per poter applicare all'uomo queste teorie. Tuttavia uno studio recente svolto da uno di noi (Pollitt) e da alcuni suoi collaboratori rafforza ulteriormente la tesi che la malnutrizione influenzi lo sviluppo intellettivo del bambino compromettendo molti differenti aspetti della crescita. La ricerca fornisce anche informazioni più dettagliate sul modo in cui, durante l'infanzia, dieta insufficiente e problemi economici cospirano nel ridurre quelle che saranno le capacità intellettive nella vita adulta. Fra i collaboratori di Pollitt in questo lavoro vi erano Reynaldo Martorell della Emory University, Kathleen S. Gorman dell'Università del Vermont, Patrice L. Engle della California Polytechnic State University e Juan A. Rivera dell'Institute of Nutrition of Central America and Panama.

Il Progetto prevedeva un esteso *follow-up* di bambini guatemaltechi che erano stati studiati da altri scienziati anni prima. Nel 1969 l'Institute of Nutrition of Central America and Panama, con l'aiuto di diversi enti governativi e fondazioni private degli Stati Uniti, diede inizio a uno studio su vasta scala per valutare l'efficacia degli integratori alimentari nella prevenzione dei problemi correlati alla malnutrizione. Per otto anni, gli abitanti di quattro villaggi del Guatemala hanno ricevuto l'uno o l'altro di due integratori alimentari. Dal momento che le proteine sono le più importanti sostanze nutritive che tendono a essere insufficienti nella dieta dei paesi in via di sviluppo, i ricercatori che hanno lavorato al progetto miravano ad appurare in quale misura i bambini rispondessero a un'integrazione proteica della loro dieta. Le madri e i bambini di due villaggi hanno ricevuto un integratore ad alto contenuto proteico chiamato Atole (il nome guatemalteco di una farinata di mais), mentre gli abitanti di altri due villaggi (che rappresentavano il gruppo di controllo) hanno ricevuto Fresco, una bevanda non proteica dolce al gusto di frutta. Entrambi gli integratori fornivano vitamine e minerali, ma l'apporto calorico di Fresco era un terzo di quello di Atole.

Quando è stato il momento di iniziare lo studio, tutte le donne in gravidanza e i bambini al di sotto dei sette anni abitanti nei quattro villaggi sono stati invitati a partecipare. Nel corso dello studio, è stato chiesto di entrare a far parte del progetto anche ai bambini di meno di sette anni che si trasferivano nei villaggi e alle donne che iniziavano una gravidanza. Tra il 1969 e il 1977 hanno partecipato alla ricerca più di 2000 bambini e madri. Regolari esami clinici hanno rivelato che entrambi gli integratori miglioravano lo stato di salute dei partecipanti, anche se Atole dava risultati più significativi. Per esempio, in tutti e quattro i villaggi era diminuita la mortalità infantile, ma in quelli che avevano ricevuto Atole la mortalità si era ridotta del 69 per cento, mentre nei villaggi che avevano ricevuto Fresco la diminuzione era stata solo del 24 per cento. Inoltre, solo Atole favoriva la crescita nei bambini al di sotto dei tre anni.

Nello studio di follow-up, svolto nel 1988 e 1989, Pollitt e colleghi sono tornati nei villaggi per controllare in quale misura gli integratori alimentari somministrati in precedenza avessero influenzato lo sviluppo intellettivo a lungo termine. Più del 70 per cento dei partecipanti originari - che ormai avevano un'età compresa tra gli 11 e i 27 anni - hanno accettato di prendere parte al follow-up.

In particolare, l'analisi si è concentrata sul gruppo di circa 600 persone che avevano ricevuto l'uno o l'altro dei due integratori prima della nascita e almeno fino ai due anni di età. Questi adolescenti e giovani adulti hanno sostenuto test di vocabolario, lettura e scrittura, un esame di cultura generale, un test di aritmetica e un test standard non verbale di intelligenza. I ricercatori hanno quindi determinato in che modo il punteggio ottenuto nei test poteva essere correlato con l'istruzione e la condizione economica (stabilita in base al tipo di abitazione, all'occupazione del padre e al livello di istruzione della madre).

I soggetti che avevano ricevuto Atole nei primi anni di vita hanno ottenuto risultati significativamente migliori nella maggior parte dei test cognitivi rispetto a quelli che avevano ricevuto Fresco. Gli effetti più significativi di Atole sono stati osservati in coloro che si trovavano ai livelli più bassi della scala economica e sociale: questi soggetti hanno infatti ottenuto risultati simili a quelli dei ragazzi più privilegiati dei loro villaggi (*si veda la finestra in queste due pagine*). Quindi Atole aveva funzionato anche come equalizzatore sociale, aiutando i figli delle famiglie a basso reddito a raggiungere lo stesso livello dei loro coetanei del medesimo villaggio appartenenti a famiglie leggermente più fortunate. Tuttavia i ragazzi partecipanti a questo studio vivevano comunque tutti in estrema povertà e non hanno ottenuto gli stessi risultati di soggetti appartenenti, per esempio, a famiglie a medio reddito di una zona più prospera del Guatemala. Quindi un'alimentazione adeguata non poteva, da sola, compensare interamente gli effetti negativi della povertà sullo sviluppo intellettivo.

Inoltre sembrava che Atole avesse incrementato i vantaggi dell'istruzione. Per ogni anno supplementare di scuola, aumentavano le differenze di apprendimento tra gli adolescenti che avevano ricevuto Atole e quelli che avevano consumato Fresco. Questo risultato indica che una dieta povera può vanificare i vantaggi dell'istruzione. In studi svolti separatamente ma correlati, Pollitt e collaboratori, che lavoravano in Perù, e Sally Grantham-McGregor della University of the West Indies, che lavorava in Giamaica, hanno dimostrato che le capacità di apprendere sono influenzate dall'ultimo pasto che è stato fatto. Quindi è importante che, prima di andare a scuola, i bambini abbiano la possibilità di fare una buona colazione.

I migliori effetti a lungo termine ottenuti dal gruppo che aveva consumato Atole possono essere giustificati in larga misura da differenze relative all'abilità motoria, alla crescita fisica e allo sviluppo sociale ed emotivo dei bambini. Coloro che avevano ricevuto Fresco nei primi anni di vita mostravano problemi fisici maggiori - una crescita più lenta e una minore velocità di ripresa dopo un'infezione - rispetto a quelli che avevano ricevuto Atole. Inoltre i neonati del gruppo di controllo avevano imparato a camminare in media un poco più tardi di quelli che avevano consumato Atole. Pollitt e collaboratori ipotizzano che, nei bambini che hanno ricevuto Fresco, queste limitazioni fisiche abbiano ritardato l'acquisizione delle capacità cognitive che i bambini normalmente sviluppano nell'esplorare il proprio ambiente sociale e fisico.

Oltre a ciò, dato che questi bambini denutriti apparivano poco sviluppati per la loro età, era possibile che gli adulti avessero una certa tendenza a trattarli

come se fossero più giovani di quanto erano in realtà. Un simile atteggiamento potrebbe aver rallentato lo sviluppo cognitivo nel caso i bimbi non fossero stati stimolati (per esempio a parlare) allo stesso modo dei loro coetanei normalmente sviluppati. Al contrario, i bambini che hanno ricevuto Atole hanno evitato la malnutrizione, sono cresciuti più rapidamente e, con tutta probabilità, sono stati esposti a più stimoli nel loro ambiente sociale. Naturalmente i risultati non escludono la possibilità che coloro che hanno ricevuto Fresco possano aver sofferto di un qualche danno cerebrale tale da impedire direttamente l'apprendimento; tuttavia i dati implicano che fattori aggiuntivi, come l'ambiente sociale del bambino, abbiano avuto anch'essi un ruolo importante.

I risultati ottenuti in Guatemala sono anche in accordo con le ipotesi più accettate sulle interazioni tra alimentazione inadeguata, povertà e istruzione. Gli integratori alimentari combattono gli svantaggi della povertà, ma solo in parte. Un bambino ben nutrito può essere maggiormente in grado di esplorare il suo ambiente, ma una comunità povera può offrire ben poco da scoprire. E anche se le scuole possono fornire molti degli stimoli di cui i bambini hanno bisogno, la malnutrizione nei primi anni di vita può compromettere il valore complessivo dell'istruzione. Inoltre, cosa estremamente importante, questo studio dimostra che un'alimentazione inadeguata nella prima infanzia può continuare a danneggiare le prestazioni intellettive anche nell'età adulta.

Dal momento che lo studio condotto in Guatemala era concepito espressamente per studiare il ruolo delle proteine, i risultati enfatizzano l'importanza di queste sostanze per la crescita intellettiva. Gli integratori contenevano anche vitamine e minerali - componenti di cui si dovrebbe comunque tenere conto - ma il modo in cui è stato concepito questo studio rende difficile separare i singoli effetti.

Altri lavori di ricerca consentono di mettere in relazione le vitamine e i minerali essenziali con le capacità mentali. Per esempio, in uno studio effettuato nella parte occidentale di Giava, Pollitt e colleghi hanno dimostrato che vi è una stretta associazione tra anemia da carenza di ferro (la conseguenza più comune della malnutrizione) e riduzione delle capacità mentali e motorie nei bambini. I ricercatori hanno fornito integratori a base di ferro ai bambini di età compresa tra 12 e 18 mesi che soffrivano di anemia da carenza di ferro e hanno potuto osservare come il minerale migliorasse in modo significativo i punteggi ottenuti da questi bambini in test di abilità motoria e mentale.

Un altro aspetto di questo problema è che i bambini con anemia da carenza di ferro sono più suscettibili all'intossicazione da piombo che, nelle grandi città, può essere dovuta alla combustione della benzina e che produce una serie di disturbi neurologici specifici che influiscono sull'attività cognitiva. Di conseguenza i bambini poveri sono esposti a un duplice pericolo: hanno più probabilità di essere anemici e anche di risentire negativamente dell'avvelenamento da piombo.

Studi come quello svolto in Guatemala hanno indotto parecchi studiosi, tra cui uno di noi (Brown), a ipotizzare che, anche quando le caratteristiche socioeconomiche dell'ambiente nel quale vive un bambino non possono essere facilmente cambiate, sia almeno possibile ridurre i deficit cognitivi dovuti alla povertà garantendo un'alimentazione adeguata durante e dopo l'infanzia. Ciononostante, gli integratori alimentari non possono annullare da soli gli effetti nocivi a lungo termine di una denutrizione pregressa. La soluzione ideale consisterebbe nel favorire il ruolo educativo di un genitore o di un altro adulto legato al bambino, in modo che a quest'ultimo vengano forniti stimoli adeguati. Ricerche recenti hanno dimostrato che programmi educativi completi per bambini appartenenti a comunità povere possono spesso alleviare alcuni problemi associati alla malnutrizione pregressa.

Per risultare il più possibile utile, un simile intervento dovrebbe essere di vasta portata e protratto nel tempo. La maggior parte dei bambini denutriti è costretta ad affrontare continui problemi che possono aggravare in misura notevole gli effetti deleteri della malnutrizione. Questi bambini abitano spesso in zone con scuole di pessima qualità e con pochissima o nessuna assistenza medica. I loro genitori sono sovente disoccupati o hanno occupazioni con salari ridottissimi. In molti casi i bambini soffrono di malattie che tolgono loro l'energia necessaria per l'impegno dell'apprendimento.

Tirando le somme, risulta chiaro che la prevenzione della malnutrizione nei bambini è la strategia vincente non solo da un punto di vista morale, ma anche economico. Gli Stati Uniti, per esempio, investono miliardi di dollari nell'istruzione, ma molto di questo denaro va sprecato se lo scarso rendimento scolastico dei bambini ha una base fisiologica connessa alla denutrizione. Le spese per i programmi che provvedono a una adeguata nutrizione o forniscono forme più complete di sostegno ai bambini disagiati dovrebbero essere considerate un investimento fondamentale per il futuro. Pregiudicando la capacità di apprendimento dei bambini e quella professionale degli adulti, la malnutrizione danneggia in modo inaccettabile non solo gli individui, ma intere nazioni. Tutti i passi che si intraprendono oggi per combattere la malnutrizione e i suoi effetti sullo sviluppo intellettivo potranno contribuire in misura enorme a migliorare la qualità della vita e la produttività di ampi strati della popolazione e della società nel suo complesso.

I risultati delle ricerche più recenti dimostrano che la malnutrizione ostacola lo sviluppo delle capacità cognitive attraverso varie modalità interagenti. I primi modelli della malnutrizione consideravano che i deficit cognitivi fossero esclusivamente il risultato di un danno cerebrale (*in alto*). Ora gli scienziati sono convinti (*in basso*) che la malnutrizione alteri lo sviluppo intellettivo interferendo anche con lo stato globale di salute, nonché con l'energia disponibile per il bambino e con la velocità della crescita e dello sviluppo motorio. Oltre a ciò, una condizione economica disagiata può aggravare questi fattori, il che espone maggiormente i bambini poveri al rischio di affrontare la vita da adulti con menomazioni cognitive.

L'importanza di un'alimentazione adeguata

Con il passare del tempo le teorie su ciò che costituisce malnutrizione sono state continuamente perfezionate, e si sono messe a punto migliori strategie di intervento. I primi studi consideravano la carenza di proteine nella dieta dei bambini come il fattore più grave di malnutrizione, specialmente nei paesi in via di sviluppo.

Le proteine ingerite con il cibo vengono ridotte ad amminoacidi, i quali, a loro volta, sono utilizzati per costruire specifiche proteine necessarie all'individuo. Le proteine formano molti elementi strutturali dell'organismo e svolgono la maggior parte dei processi cellulari. Dagli anni settanta i nutrizionisti hanno iniziato a preoccuparsi anche della carenza di apporto calorico: infatti, per sopperire a questa, l'organismo brucia gli amminoacidi allo scopo di produrre energia invece di usarli per costruire nuove proteine.

Negli ultimi anni la ricerca sulla nutrizione ha posto l'accento sul fatto che carenze di vitamine e minerali - in particolare di vitamina A, iodio e ferro - contribuiscono in modo significativo a generare problemi per la salute. La vitamina A è importante per la capacità visiva, la crescita ossea, lo sviluppo dei denti e la resistenza alle infezioni. Lo iodio, che tende a scarseggiare nella dieta dei paesi in via di sviluppo, è necessario per il funzionamento del sistema nervoso centrale. Il ferro è un costituente dell'emoglobina, che trasporta l'ossigeno ai tessuti. Il ferro aiuta anche l'organismo a combattere le infezioni; i livelli di questo minerale risultano assai bassi nella dieta di molti bambini denutriti negli Stati Uniti. Quindi, per assicurare una crescita normale, è necessario fare in modo che l'apporto di proteine, calorie, vitamine e minerali sia adeguato.

I fabbisogni nutritivi dei bambini possono essere soddisfatti se vengono alimentati più volte al giorno con cibi che appartengono a ognuna delle cinque categorie illustrate.

J. LARRY BROWN ed ERNESTO POLLITT collaborano da anni allo studio dell'alimentazione infantile e dei risvolti sociali e politici della malnutrizione. Brown, direttore del Center on Hunger, Poverty and Nutrition Policy della Tufts University, è anche professore di scienza dell'alimentazione e politica sanitaria alla School of Nutrition Science and Policy e alla School of Medicine di questa università. Pollitt è professore di sviluppo umano al Dipartimento di pediatria della School of Medicine dell'Università della California a Davis, nonché membro del Program of International Nutrition.

GALLER JANINA R. (a cura), *Nutrition and Behavior*, Plenum Press, 1984.

MARTORELL REYNALDO e SCRIMSHAW NEVIN S., (a cura), *The Effects of Improved Nutrition in Early Childhood: The Institute of Nutrition of Central America and Panama (INCAP) Follow-up Study*, supplemento al «Journal of Nutrition», 125, n. 4S, aprile 1995.

POLLITT ERNESTO (a cura), *The Relationship between Undernutrition and Behavioral Development in Children*, supplemento al «Journal of Nutrition», 125, n. 8S, agosto 1995.

Il Global Positioning System

Uno sciame di satelliti orbitanti a circa 20 000 chilometri di quota consente una determinazione estremamente precisa delle proprie coordinate in qualunque parte del mondo

di Thomas A. Herring

Mentre eseguiva l'ultima virata prima dell'avvicinamento finale, il Boeing 737 rispose dolcemente al comando del pilota automatico computerizzato, apprestandosi a quello che si annunciava come l'ennesimo atterraggio perfetto. Per quanto gli avvicinamenti automatici vengano ordinariamente eseguiti in cattive condizioni di visibilità, questo particolare velivolo non stava utilizzando le normali segnalazioni inviate dalla torre di controllo dell'aeroporto per completare il suo atterraggio di categoria IIIA (quello che si effettua quando il pilota non può vedere la pista di atterraggio fino a quando l'aereo non ha toccato terra): l'equipaggio stava affidandosi invece ai satelliti del Global Positioning System (GPS) messi in orbita dallo US Department of Defense. Questi moderni capisaldi di navigazione, posti a una quota di oltre 20 000 chilometri, avrebbero ancora una volta dovuto condurre il velivolo a prender terra senza problemi.

Quando il 737 si trovò in prossimità della pista, i segnali GPS indicarono che il suolo era solo 300 piedi sotto il carrello, e il velivolo rallentò la discesa. Avendo completato numerosi atterraggi in quello stesso giorno, i tecnici a bordo avevano ormai una certa fiducia nella guida automatica da satellite. Ma questa volta il pilota automatico fece improvvisamente suonare un allarme: il dispositivo GPS aveva perso il contatto con il segnale di un satellite che in quel momento era di importanza critica. Il pilota umano dell'aereo riprese rapidamente i comandi e aumentò il regime dei motori riuscendo a scongiurare un potenziale disastro.

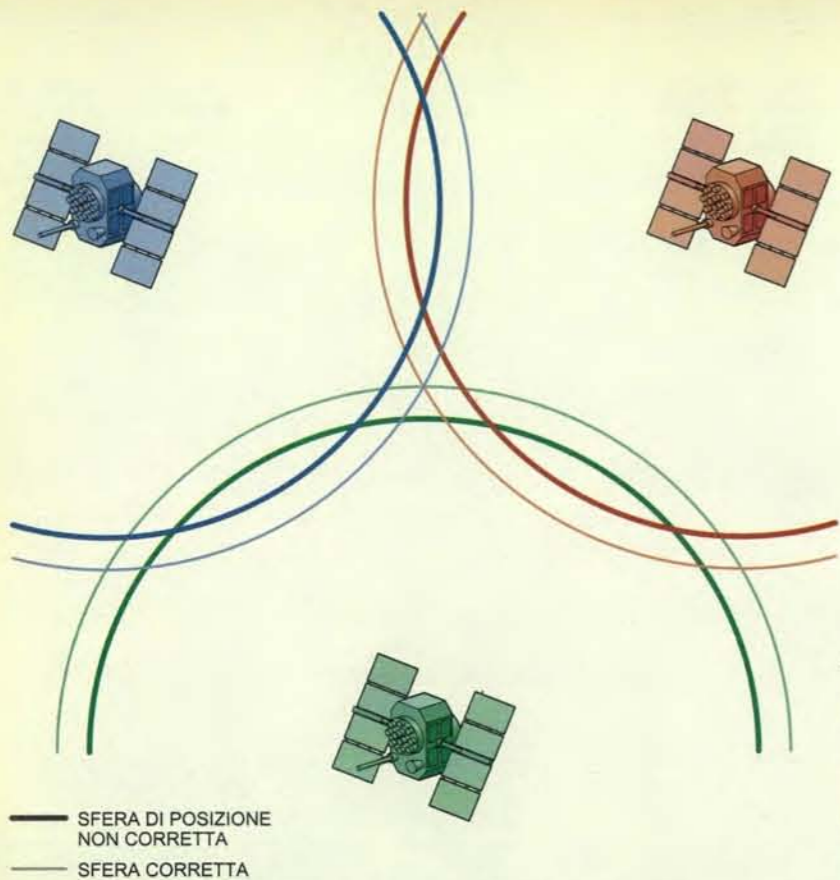
Dopo un'analisi dell'accaduto, i tecnici che avevano messo a punto il dispositivo di guida del velivolo si accorsero che la perdita momentanea del segnale era stata causata da un «baco» nel software del satellite GPS. Il difetto non era stato rilevato prima perché nessuno fino a quel momento aveva fatto affidamento sul GPS per un compito così impegnativo. Il Global Positioning System era stato infatti progettato con una incertezza di 100 metri nella determinazione della posizione. Qualche anno fa ben pochi avrebbero osato immaginare che il GPS sarebbe stato in grado di condurre un aeroplano fino a terra. Ma da allora alcuni ingegnosi ritocchi al sistema hanno prodotto un livello sorprendente di precisione, e il GPS si è trasformato in qualcosa che i progettisti non avevano previsto quando lanciarono il primo dei suoi satelliti.

Il Department of Defense iniziò la realizzazione del suo sistema di localizzazione da satellite a metà degli anni settanta, per consentire a navi, aeroplani e veicoli terrestri dell'esercito di determinare la propria posizione in qualunque punto del globo si trovassero. Sebbene i progettisti del GPS avessero concepito il sistema in primo luogo per operazioni militari, essi fecero in modo che anche i civili potessero utilizzare i segnali da satellite per determinare la propria posizione, anche se con precisione di gran lunga inferiore. Una riduzione della precisione sembrava necessaria per i segnali non classificati; altrimenti il nemico avrebbe potuto facilmente utilizzare le trasmissioni GPS, e il sofisticato sistema satellitare non avrebbe dato agli Stati Uniti alcun vantaggio tattico. Notevole a dirsi, scienziati e ingegneri non militari hanno da allora escogitato vari metodi per ovviare alla voluta degradazione dei segnali GPS, e i comuni cittadini possono ora conseguire risultati molto migliori di quanto il Department of Defense avesse mai previsto.

Questi perfezionamenti permettono ai ricevitori radio di segnali GPS di guidare imbarcazioni da diporto in mezzo alla nebbia o automobili lungo strade poco familiari al guidatore. Il GPS è usato perfino per controllare gli spostamenti dei *container* nell'intasatissimo porto di Singapore. Ancora più impressionante è il fatto che, con questo sistema, i geologi siano in grado di misurare impercettibili deformazioni della crosta terrestre (dell'ordine di pochi millimetri all'anno) che corrispondono agli spostamenti delle zolle crostali, e così definire la posizione e l'estensione delle zone soggette a rischio sismico.

Gli intoppi che talvolta sopravvengono durante queste applicazioni non possono essere considerati *défaillance*, ma indicazioni del fatto che gli impieghi non militari stanno spingendo la strumentazione GPS verso limiti non previsti dai progettisti del sistema. Ma in che modo il Department of Defense intendeva precludere ai civili l'accesso alla precisione intrinseca del segnale? E perché tante persone sono riuscite ad aggirare le limitazioni imposte? Per rispondere a queste domande, occorre comprendere come funzioni esattamente la navigazione dei satelliti in generale e quella dei satelliti GPS in particolare.

Poco dopo il lancio del primo satellite sovietico *Sputnik* nel 1957, alcuni scienziati e ingegneri si resero conto che le trasmissioni radio da satelliti in orbita ben definita avrebbero potuto indicare la posizione di un ricevitore a terra. A questo scopo bastava sfrut-

Queste sfere di posizione esemplificano la base geometrica che permette il funzionamento del Global Positioning System. Ricevendo emissioni radio codificate, una persona a terra è in grado di determinare la propria distanza da ognuno di molti satelliti che si muovono in configurazioni orbitali note con precisione. Ogni misura di distanza coincide con una serie di localizzazioni possibili che formano una sfera immaginaria avente il centro in corrispondenza del satellite che emette il segnale. L'intersezione di molte di queste sfere con la superficie terrestre individua la localizzazione esatta della persona.

Alfred T. Kamajian

Un errore di temporizzazione del dispositivo elettronico ricevente di solito fa sì che le misurazioni della distanza dei satelliti GPS risultino piuttosto imprecise. Come conseguenza, le corrispondenti sfere di posizione (*linee spesse*) non si intersecano esattamente in un solo punto. Un leggero aggiustamento in avanti o all'indietro dell'orologio del ricevitore, tuttavia, permette a tutte le sfere di incontrarsi con precisione (*linee sottili*). Nell'illustrazione questo metodo sembra richiedere misurazioni da tre soli satelliti, ma in tre dimensioni ne occorrono almeno quattro.

tare lo spostamento Doppler dei segnali radio al passaggio del satellite. Con questo metodo, la US Navy sperimentò negli anni sessanta il cosiddetto Transit Satellite Positioning System.

La tecnica impiegata dalla US Navy era purtroppo alquanto macchinosa. Essa richiedeva costosi strumenti elettronici a terra e normalmente esigeva la ricezione di due segnali separati forniti da due passaggi del satellite, il che comportava un'attesa di oltre 100 minuti. Anche nelle condizioni più favorevoli, con parecchi giorni a disposizione per la raccolta dei segnali, non si poteva sperare di fare il punto con una precisione inferiore a circa un metro.

Ma anche prima di mettere in orbita il primo satellite Transit, il Department of Defense aveva già iniziato a contemplare la possibilità di un approccio assai più sofisticato, che avrebbe per esempio potuto consentire al pilota di un caccia di determinare istantaneamente la propria esatta posizione. In particolare, la US Air Force progettava un sistema di navigazione che sfruttasse la misurazione delle distanze di numerosi satelliti anziché lo spostamento Doppler delle radiofrequenze.

La determinazione della posizione tramite la misurazione della distanza è un concetto molto intuitivo. Supponiamo, per esempio, di essere in grado di determinare che un particolare satellite si trova a 20 000 chilometri di distanza da noi. Pertanto la nostra posizione deve trovarsi sulla superficie dell'enorme sfera di raggio pari a 20 000 chilometri che circonda il satellite. Dal momento che i satelliti viaggiano su orbite stabili e predicibili, la posizione del satellite e della sfera immaginaria che lo circonda sono note con esattezza.

Se, nello stesso istante in cui viene determinata la prima distanza, si è in grado di misurare anche la distanza di un secondo satellite, allora può essere stabilita una seconda «sfera di posizione». Una terza distanza relativa a un terzo satellite fornisce un'ulteriore sfera, e così via. In generale, i punti in cui tutte le sfere si incontrano non saranno molti. Per esempio, due sfere si intersecano lungo un cerchio; tre sfere possono coincidere solo in due punti. Dal momento che uno dei due rappresenta tipicamente una soluzione non ragionevole a un problema di navigazione (per esempio può cadere nell'interno della Terra oppure nello spazio), tre distanze di satelliti sono sufficienti per determinare esattamente una posizione.

La prima questione che doveva essere affrontata dai progettisti militari per la realizzazione del GPS consisteva nello stabilire esattamente come effettuare le necessarie misurazioni di distanza. All'epoca si poteva scegliere tra diverse alternative. Per esempio, un dispositivo radar poteva trasmettere un impulso radio e rilevare l'eco riemessa da un satellite. Un computer avrebbe allora facilmente calcolato la distanza del satellite attraverso il ritardo misurato e la velocità dell'impulso radio, che è pari a quella della luce e quindi nota.

Ma un simile sistema imporrebbe a chiunque ne volesse usufruire di emettere intensi segnali radar, cosa certo non ideale per soldati, marinai o piloti che cerchino di evitare l'identificazione da parte del nemico. Di conseguenza il Department of Defense considerò una strategia alternativa. I satelliti per la navigazione potevano trasmettere impulsi radio in momenti prefissati, cosicché, determinando l'esatto tempo di arrivo degli impulsi, il dispositivo ricevente sarebbe stato in grado di risalire alla distanza del satellite emittente. Il procedimento implicava che l'orologio del ricevitore fosse perfettamente sincronizzato con quello del satellite. Questo concetto divenne la base sulla quale doveva prendere forma il Global Positioning System.

Una sincronizzazione perfetta può sembrare a prima vista un requisito assai severo: un'imprecisione pari a un milionesimo di secondo si tradurrebbe in un errore di circa 300 metri. Sebbene i satelliti siano equipaggiati con orologi atomici di estrema precisione, dotare allo stesso modo ogni ricevitore avrebbe costi assolutamente proibitivi. Ma vi è un modo per fare a meno degli orologi atomici nei dispositivi a terra: si deve solo stabilire l'entità della deriva dell'orologio del ricevitore rispetto a quello dei satelliti.

Questo compito non è particolarmente difficile. Si comincia assumendo che l'orologio del ricevitore sia approssimativamente corretto per il calcolo delle distanze di quattro satelliti. Dato che l'orologio del ricevitore non è di fatto esattamente sincronizzato con quello dei satelliti, le distanze calcolate, dette pseudodistanze, non saranno del tutto corrette. Le quattro pseudodistanze corrisponderanno a quattro sfere immaginarie che circondano i satelliti. Queste quattro sfere dovrebbero idealmente intersecarsi in un singolo punto - la posizione del ricevitore - ma non si incontreranno esattamente, dal momento che gli orologi dei satelliti e quello del ricevitore non sono sincronizzati in modo perfetto. Tutte e quattro le sfere risulteranno un po' troppo grandi (se l'orologio del ricevitore tende ad accelerare) o troppo più piccole (se tende a ritardare). Ma esiste un valore di errore dell'orologio per il quale le quattro sfere si incontrano perfettamente, cosicché bastano pochi calcoli algebrici per stabilire l'aggiustamento necessario. Pertanto anche un semplice ricevitore dotato di un orologio elettronico non più complicato o costoso di un ordinario orologio digitale da polso può essere facilmente sincronizzato con gli orologi atomici che sfrecciano nel cielo.

Come passo successivo, i progettisti del sistema dovevano decidere esattamente in che modo trasmettere i segnali dai satelliti GPS. Essi mutuarono una tecnica che era stata impiegata dagli astronomi fin dagli anni cinquanta. Questi scienziati avevano studiato altri pianeti inviando impulsi radar con i loro giganteschi radiotelescopi in momenti che, per quanto apparissero casuali, seguivano in realtà un codice accuratamente formulato. Queste speciali cadenze erano denominate sequenze pseudocasuali (*pseudo-random*). Grazie a esse, era possibile misurare il ritardo temporale nelle deboli riflessioni radar della superficie di un lontano pianeta determinando l'istante al quale i segnali ricevuti e la sequenza pseudocasuale trasmessa sembravano corrispondere maggiormente. In sostanza, i radioastronomi ricavavano il tempo di percorrenza (e quindi la distanza del bersaglio radar) riferendosi all'istante in cui i due segnali risultavano più strettamente correlati.

I successi conseguiti con questa tecnica persuasero i progettisti militari a optare per l'uso di analoghe sequenze pseudocasuali per il loro nuovo sistema di posizionamento con base nello spazio. Essi decisero però che i satelliti GPS avrebbero emesso onde radio di alta frequenza in continuo, anziché impulsi radar discreti. L'uso di sequenze pseudocasuali per codificare le emissioni radio offriva molti vantaggi. Un be-

Sequenze pseudocasuali sono trasmesse dai satelliti GPS a scadenze prefissate. Il ritardo nei tempi di arrivo delle emissioni radio si ricava confrontando il segnale rumoroso ricevuto (*in rosso*) con versioni della sequenza nota (*in grigio*) che sono state traslate nel tempo. Un'alta correlazione tra la sequenza codificata e il segnale (*a destra*) indica il lasso di tempo intercorso fra trasmissione e ricezione del segnale.

Gli strati dell'atmosfera alterano i segnali GPS e possono introdurre errori significativi. Gli effetti più importanti insorgono quando le onde radio passano attraverso la ionosfera terrestre, elettricamente carica, e la troposfera ricca di vapore acqueo. Mentre nella ionosfera i fronti delle onde radio tendono ad allontanarsi, nella troposfera accade il contrario (*nel riquadro*). Dal momento che questi disturbi dei segnali GPS possono essere misurati tramite un ricevitore fisso, il National Weather Service è ora in grado di misurare in questo modo il contenuto di vapore acqueo degli strati più bassi dell'atmosfera.

Il GPS differenziale aggira gli errori di temporizzazione imposti per motivi di sicurezza militare. Un ricevitore fisso in posizione nota determina gli errori dei segnali emessi dai satelliti (*in rosso*) e trasmette via radio le correzioni (*in blu*) ai ricevitori mobili nelle vicinanze. Questo metodo consente di ridurre l'incertezza del posizionamento da 100 metri a circa un metro.

neficio che sarebbe stato enormemente apprezzato da naviganti ed escursionisti negli anni successivi fu la possibilità di realizzare ricevitori GPS a basso costo. Tutti i satelliti potevano quindi trasmettere sulla stessa frequenza senza creare un guazzabuglio di interferenze radio. Dato che ogni satellite GPS avrebbe trasmesso un proprio codice, un ricevitore radio poco costoso a frequenza singola sarebbe stato in grado di separare facilmente i diversi segnali.

L'ultima decisione che i progettisti militari dovevano prendere riguardava il dove mettere i satelliti. Le orbite in cui sono collocati quasi tutti i satelliti sono di due tipi: la cosiddetta orbita bassa, relativamente vicina alla Terra, e quella geosincrona o geostazionaria, che ha un periodo di 24 ore ed è situata circa 36 000 chilometri al di sopra dell'equatore. La prima soluzione avrebbe comportato un costo per lancio relativamente basso e avrebbe richiesto trasmettitori di modesta potenza in quanto i segnali avrebbero dovuto coprire una distanza piuttosto breve; per garantire una copertura globale, però, sarebbero stati necessari centinaia di satelliti che sciamassero attorno al nostro pianeta. L'orbita geostazionaria, d'altro canto, avrebbe richiesto satelliti in numero di gran lunga inferiore, ma equipaggiati con trasmettitori molto più potenti; inoltre i loro segnali avrebbero raggiunto con difficoltà le regioni polari.

I progettisti del GPS optarono per una soluzione di compromesso collocando i satelliti in orbite intermedie, vale a dire a un'altitudine di circa 20 000 chilometri. A questa quota, sarebbero bastati 17 satelliti per assicurare che almeno quattro di essi - il minimo indispensabile per determinare una posizione - fossero sempre ricevibili da un qualunque punto sulla superficie terrestre. La configurazione finale adottata per il GPS comprende 21 satelliti principali e tre di riserva.

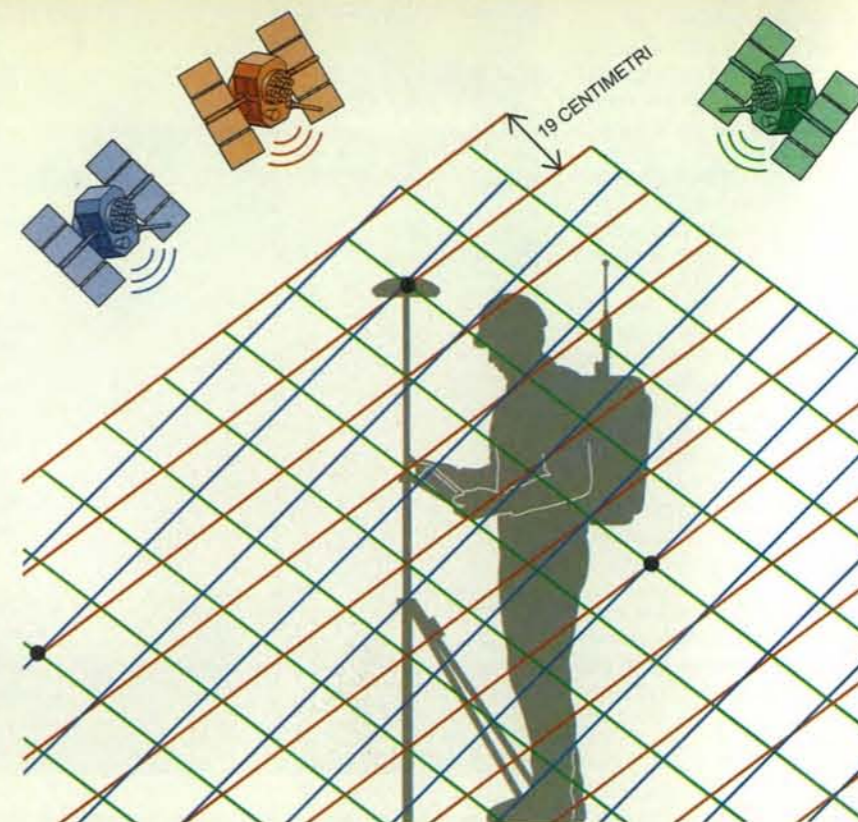
Dal momento che le forze armate statunitensi intendevano acquisire un vantaggio tattico con il nuovo sistema di navigazione satellitare, si provvide in un primo momento a codificare le emissioni radio per impedire che gli avversari si avvalessero delle stesse possibilità. Ma il Department of Defense prevedeva fin dall'inizio che il pubblico avrebbe finito per utilizzare i segnali GPS, almeno in forma grossolana. I progettisti del sistema dovettero allora affrontare il problema di come limitare

La navigazione strumentale non sarà più una prerogativa delle navi in mezzo alla nebbia: le persone non vedenti potranno usufruire del GPS per spostarsi in ambiente esterno. Questa applicazione sperimentale, come parecchie altre, sarebbe molto facilitata dall'abolizione delle protezioni militari del segnale.

Catturare le onde

I geofisici applicano il GPS dalla metà degli anni ottanta per meglio seguire la lenta ma inesorabile deformazione della crosta terrestre in regioni geologicamente attive. Per questo tipo di ricerche, essi chiedono al GPS il massimo della precisione, e spesso impiegano a questo scopo la cosiddetta tecnica di «inseguimento dell'onda portante» (*carrier tracking*). Rispetto al GPS differenziale (che determina una posizione con approssimazione dell'ordine di un metro), l'inseguimento dell'onda portante permette approssimazioni dell'ordine di pochi millimetri.

La tecnica prende il suo nome dalle trasmissioni da satellite che convogliano i segnali GPS su una serie di cosiddette onde portanti. Per applicarla, si determina quale parte dell'onda radio colpisca l'antenna a un dato istante, vale a dire si trova la «fase» dell'emissione ricevuta. Così come un nuotatore riesce a distinguere quando si trova sulla cresta o nel ventre di un'onda, oppure in qualche punto intermedio, la tecnica permette di determinare in quale punto dell'onda radio GPS della lunghezza di 19 centimetri si trovi l'antenna del ricevitore.

L'inseguimento dell'onda portante permette una risoluzione pari a una piccola frazione della lunghezza d'onda. La difficoltà principale sta nel determinare quale di molte onde identiche l'antenna stia ricevendo. Vi sono parecchi modi per risolvere questa ambiguità, il più semplice dei quali consiste nel seguire simultaneamente la fase dell'onda portante di più satelliti. Se, per esempio, l'antenna ricevente fosse collocata in corrispondenza dell'inizio delle onde (fase zero) inviate da tre satelliti differenti, vi sarebbe un numero limitato di punti tali da rendere possibile questa coincidenza (*pallini in nero*). Disponendo di un numero sufficiente di satelliti, questi punti sono spaziati di circa un metro. Pertanto, nota la posizione approssimativa dell'antenna (per mezzo del GPS differenziale), si può determinare quale dei punti individuati segni la localizzazione corretta.

Nella pratica, l'inseguimento dell'onda portante si rivela una tecnica piuttosto delicata. Alcuni impieghi, come il sistema per l'atterraggio di aerei sviluppato da Bradford W. Parkinson e colleghi della Stanford University, necessitano di un hardware specifico per assicurare la correttezza delle soluzioni. Questi lavori sono resi più ardui da una protezione introdotta dal Department of Defense, il cosiddetto *anti-spoofing* (anti-beffa). Come la codificazione degli errori di temporizzazione (chiamata disponibilità selettiva), l'*anti-spoofing* rende assai complesse e costose molte straordinarie applicazioni civili di alta precisione del GPS.

il grado di accuratezza per i civili pur consentendo ai militari di utilizzare il GPS al pieno del suo potenziale. Vi erano diverse alternative per conseguire questo risultato. Uno dei metodi consisteva nel trasmettere informazione inesatta alle parti non autorizzate quasi nel preciso momento in cui i satelliti avevano inviato i loro segnali. La sincronizzazione temporale del GPS poteva essere leggermente spostata alterando gli orologi atomici dei satelliti secondo un codice specifico. Questo «sfarfallio» degli orologi, denominato «disponibilità selettiva», sembrerebbe essere appunto il metodo impiegato dal Department of Defense per garantire la sicurezza del GPS. I segnali modificati permettono a chiunque di stabilire la propria posizione con un accettabile grado di approssimazione: l'errore non è comunque superiore al centinaio di metri. I ricevitori militari equipaggiati per interpretare il codice classificato possono ottenere localizzazioni molto più precise semplicemente rimuovendo gli errori di temporizzazione introdotti.

Gli scienziati e gli ingegneri civili interessati al GPS, comunque, non hanno impiegato molto tempo per riuscire ad aggirare le limitazioni della disponibilità selettiva. Poco dopo il lancio del primo gruppo di satelliti, alcuni scienziati escogitarono modi per ridurre gli errori del GPS, in qualche caso fino a un'approssimazione di pochi millimetri. Si trattava di una precisione molte migliaia di volte maggiore di quanto i progettisti militari del sistema avessero immaginato. La prima dimostrazione di questa capacità, da parte di Charles C. Counselman III e colleghi del Massachusetts Institute of Technology, fu data senza troppe cerimonie nel parcheggio dell'Haystack Observatory di Westford, nel Massachusetts, durante l'autunno del 1980.

Per acquisire un sostanziale miglioramento di precisione, occorreva correggere gli errori negli orologi atomici dei satelliti GPS. La tecnica impiegata da Counselman e colleghi era in effetti assai semplice: in un punto fisso a terra venivano misurati i segnali di molti satelliti. Nota l'esatta posizione dell'antenna ricevente e la posizione dei satelliti, gli scienziati erano in grado di confrontare agevolmente le pseudodistanze (misurate) con le distanze reali (calcolabili). La differenza fra i due valori

rappresentava l'errore di temporizzazione del satellite, sommata all'imprecisione dell'orologio del dispositivo ricevente. Considerando simultaneamente molti satelliti, si poteva determinare l'errore dell'orologio a terra, e quindi risalire all'esatta alterazione degli orologi dei satelliti.

Lo stesso metodo può essere impiegato per aggirare la disponibilità selettiva. L'entità dello sfarfallio dell'orologio può essere determinata in una stazione fissa al suolo, e le correzioni possono essere trasmesse per radio. Ricevitori GPS mobili operanti nelle vicinanze possono usare questa informazione per calcolare localizzazioni precise. Questo metodo di «GPS differenziale» consente a chiunque di determinare le proprie coordinate con un'approssimazione inferiore al metro utilizzando dispositivi incredibilmente poco costosi. (Ricevitori GPS più specializzati possono raggiungere una precisione di circa un centimetro.) Attualmente vi è un gran numero di fonti di correzioni per il GPS differenziale, molte delle quali - fatto strano - sono gestite dallo stesso Governo statunitense. La Federal Aviation Administration, per esempio, sta iniziando a fornire questi servizi per la navigazione aerea. Anche la US Coast Guard trasmette correzioni in prossimità dei principali porti. Inoltre, molte società commerciali vendono correzioni GPS per la maggior parte del territorio statunitense, e anche per alcune altre regioni del mondo.

Thomas A. Herring

La deformazione della crosta terrestre in regioni geologicamente attive come quella di Tien Shan, in Asia centrale, può essere misurata avvalendosi della precisa localizzazione GPS di alcuni capisaldi topografici. La tecnica GPS serve pertanto come strumento di ricerca per aiutare a seguire l'accumulo di energia elastica che potrebbe finire col dar luogo a terremoti devastanti.

L'ampia disponibilità del GPS differenziale ha dato luogo a un acceso dibattito sul perché i militari continuino a spendere denaro per cifrare il GPS in tempo di pace, costringendo altri rami dell'apparato governativo a spendere risorse sempre maggiori per decodificare gli errori e trasmettere i risultati. Inoltre, per suprema ironia della sorte, durante due recenti operazioni militari in grande stile (la guerra del Golfo e l'occupazione di Haiti), il Department of Defense ha completamente disattivato le protezioni del GPS. La decisione è stata presa perché i militari non disponevano di un numero sufficiente di dispositivi per la ricezione del segnale GPS codificato, mentre i modelli per uso civile erano facilmente reperibili. (Molti militari si dotarono di questo equipaggiamento telefonando a casa e ordinando dispositivi GPS con la carta di credito. Essi contavano ovviamente sul fatto che il nemico non disponesse di missili a guida GPS e non avesse la possibilità di effettuare acquisti per posta.)

Inoltre il Governo russo sta attualmente completando un sistema di posizionamento con satelliti chiamato GLONASS (acronimo di Global Navigation Satellite System), che presenta forti somiglianze con il GPS. Il sistema russo, però, non codifica le trasmissioni, e quindi chiunque sia dotato di un idoneo dispositivo può utilizzarlo al pieno delle potenzialità. L'esistenza di GLONASS, unitamente all'ampia disponibilità di correzioni per il GPS, sembra vanificare un qualunque vantaggio militare che si possa cercare di ottenere degradando di proposito la qualità del segnale dei satelliti. Uno studio recentemente condotto dalla National Academy of Sciences ha appurato che la disponibilità selettiva è inefficace e dovrebbe essere abolita.

Di settimana in settimana emergono applicazioni sempre più ingegnose per il GPS. I meteorologi, ai fini della previsione, misurano i ritardi dei segnali GPS causati dalle condizioni atmosferiche. Gli agricoltori usano dispositivi GPS per rilevare le condizioni di ogni metro quadrato dei loro campi, in modo da distribuire i fertilizzanti con la massima efficienza. Il sistema è sempre più di aiuto per la guida di navi, aerei, elicotteri, satelliti e perfino automobili. Dispositivi in fase di sperimentazione, contenuti in zaini, aiuteranno i non vedenti a orientarsi nelle vie cittadine. Di fatto le applicazioni commerciali stanno ampiamente surclassando gli usi militari del sistema, e alla fine del millennio la vendita di dispositivi per la ricezione dei segnali GPS dovrebbe garantire annualmente circa un miliardo di dollari all'economia statunitense. Con una velocità senza precedenti, ciò che era stato sviluppato come sistema militare è divenuto una risorsa economica nazionale. In questo mondo di rapidi cambiamenti, ci si deve domandare seriamente: «Chi dovrebbe controllare il GPS?».

THOMAS A. HERRING è professore associato presso il Dipartimento di scienze della Terra, dell'atmosfera e planetarie del Massachusetts Institute of Technology. Qui si è laureato nel 1983, lavorando all'applicazione di sistemi di misurazione di alta precisione a problemi di geofisica. Da allora il suo curriculum comprende un periodo di sei anni trascorso presso l'Harvard College Observatory.

HAGER BRADFORD H., KING ROBERT W. e MURRAY MARK H., *Measurement of Crustal Deformation Using the Global Positioning System* in «Annual Review of Earth and Planetary Sciences», 19, pp. 351-382, 1991.

LOGSDON TOM, *The Navstar Global Positioning System*, Van Nostrand Reinhold, 1992.

«GPS World», rivista bimestrale pubblicata da Advanstar Communications, 859 Williamette Street, Eugene OR 97401.

International GPS Service for Geodynamics su World Wide Web: http://igscb.jpl.nasa.gov/

The University Navstar Consortium su World Wide Web: http://www.unavco.ucar.edu/

Il batterio che causa l'ulcera peptica

Da un terzo a metà della popolazione mondiale ospita Helicobacter pylori*, un batterio che infetta lo stomaco e spesso provoca ulcere e cancro*

di Martin J. Blaser

Nel 1979 J. Robin Warren, patologo presso il Royal Perth Hospital in Australia, fece un'osservazione che lo lasciò perplesso. Mentre esaminava campioni di tessuto di pazienti sottoposti a biopsia gastrica, notò che in molti di essi vi era un gran numero di batteri ricurvi a forma di spirale. Normalmente i succhi gastrici dovrebbero distruggere simili organismi prima che possano insediarsi nello stomaco. Ma quelli osservati da Warren si trovavano al di sotto dello spesso strato di muco che riveste la parete interna dello stomaco e la protegge dall'ambiente acido. Warren notò anche che i batteri erano presenti solo in quei campioni di tessuto che apparivano infiammati. Chiedendosi se i microrganismi potessero in qualche modo essere correlati all'infiammazione, cercò riscontri in letteratura e scoprì che alcuni patologi tedeschi avevano osservato analoghi organismi già un secolo prima. Poiché però non erano riusciti a farne delle colture, la loro scoperta era stata ignorata e infine dimenticata.

Anche Warren e il suo giovane ed entusiastico collaboratore Barry J. Marshall ebbero difficoltà a far crescere in coltura gli enigmatici batteri. Essi diedero il via ai loro tentativi nel 1981, ma ancora nell'aprile 1982 non erano riusciti a coltivare i campioni prelevati da una trentina di pazienti. Poi, durante le vacanze pasquali, alcune delle piastre di coltura nel laboratorio dell'ospedale rimasero accidentalmente in incubazione per cinque giorni anziché i soliti due; e il quinto giorno comparvero colonie di batteri. I ricercatori li battezzarono *Campylobacter pyloridis* perché assomigliavano ai microrganismi patogeni del genere *Campylobacter* che si trovano nell'intestino. All'inizio del 1983 Warren e Marshall pubblicarono il loro primo resoconto, e nel giro di pochi mesi ricercatori di tutto il mondo avevano isolato il batterio. Si scoprì che, in realtà, esso non rientrava nel genere *Campylobacter*, ma richiedeva la creazione di un nuovo genere, *Helicobacter*. Questi ricercatori confermarono l'osservazione iniziale di Warren che associava l'infezione da *Helicobacter pylori* alla gastrite cronica superficiale.

Questo collegamento fece sorgere una nuova questione: il tessuto infiammato facilitava in qualche modo la colonizzazione da parte di *H. pylori* oppure era il microrganismo stesso a causare l'infiammazione? Ulteriori ricerche dimostrarono che la seconda ipotesi era quella esatta. In uno di questi studi, due volontari maschi - uno dei quali era Marshall - ingerirono una sospensione concentrata di microrganismi. Inizialmente entrambi non manifestarono alcuna sintomatologia gastrica, ma in seguito svilupparono la gastrite; lo stesso fenomeno si verificava negli animali sottoposti allo stesso trattamento. In altre indagini si vide che gli antibiotici sopprimevano l'infezione e attenuavano l'irritazione. Se il microrganismo veniva debellato l'infiammazione spariva; ma se l'infezione si ripresentava, si manifestava di nuovo la gastrite. Oggi sappiamo che un'alta percentuale delle persone infettate da *H. pylori* presenta gastrite cronica superficiale. Sia l'infezione sia l'infiammazione, se non vengono trattate, durano decenni, a volte tutta la vita. Inoltre questa patologia può portare alla formazione di ulcere nello stomaco e nel duodeno, la porzione dell'intestino tenue che ha origine dal piloro. *H. pylori* potrebbe essere responsabile anche di alcune forme tumorali.

Più di 40 anni fa i medici riconobbero che la maggior parte delle persone affette da ulcera peptica soffriva anche di gastrite cronica superficiale. Per una varietà di ragioni, però, quando venne stabilito il legame tra l'infezione da *H. pylori* e la gastrite, la comunità medica non immaginò che il batterio potesse favorire anche la formazione di ulcere peptiche. In effetti, generazioni di studenti di medicina hanno imparato che lo stress fa aumentare la secrezione di succhi gastrici, i quali, a loro volta, causano ulcere. Questa teoria deriva da ricerche compiute nel 1910 dal fisiologo tedesco K. Schwartz. Questi, avendo notato che le ulcere duodenali si manifestavano solo negli individui che presentavano un'elevata acidità gastrica, coniò l'assioma: «Niente acido, niente ulcere». Sebbene l'acidità gastrica sia necessaria per la formazione di ulcere, non basta però a spiegarne la presenza: gran parte dei pazienti ulcerosi ha una secrezione gastrica normale, e alcune persone con ipersecrezione non manifestano mai ulcere.

Tuttavia la teoria che associava lo stress all'acidità gastrica guadagnò ulteriore credibilità negli anni settanta, quando vennero introdotti alcuni agenti sicuri ed efficaci per ridurre la secrezione gastrica. Molti pazienti si sentirono per la prima volta liberi dal dolore assumendo questi farmaci, chiamati bloccanti del recettore dell'istamina-2 (bloccanti del recettore H_2). Spesso queste sostanze portavano a guarigione completa delle ulcere ma, quando i pazienti cessavano di assumerli, le ulcere tornavano a manifestarsi. I pazienti erano quindi costretti a curarsi con bloccanti del recettore H_2 per anni. Data la diffusione dell'ulcera - dal 5 al 10 per cento della popolazione mondiale ne è colpita - non è sorprendente che i bloccanti del recettore H_2 siano diventati i prodotti farmaceutici più redditizi del mondo. La maggior parte delle industrie farmaceutiche aveva ben pochi incentivi nello studiare o promuovere modelli alternativi della formazione di ulcere peptiche.

Il batterio che causa l'ulcera peptica (*Helicobacter pylori*) vive nello strato di muco (*in giallo chiaro*) che riveste lo stomaco, dove è parzialmente al riparo dalla secrezione gastrica (*in rosa*). I microrganismi secernono proteine che interagiscono con le cellule epiteliali dello stomaco e attraggono macrofagi e neutrofili, cellule che causano infiammazione (*a sinistra*). I batteri producono anche ureasi, un enzima che contribuisce a degradare l'urea in ammoniaca e anidride carbonica; l'ammoniaca può neutralizzare l'acidità gastrica (*al centro*). *H. pylori* secerne inoltre tossine che contribuiscono alla formazione di ulcere (*a destra*). I microrganismi si raccolgono tipicamente nelle regioni mostrate nel diagramma all'estrema destra.

I batteri e l'ulcera

In realtà le ulcere possono essere provocate da una classe di farmaci, gli antinfiammatori non steroidei (tra i quali il

Non provatelo a casa

Michael Bailey, Università della Virginia

Barry J. Marshall (*qui a fianco*), del Royal Perth Hospital in Australia, divenne una celebrità dopo aver annunciato nel 1985 di aver ingerito *Helicobacter pylori*. Marshall sperava in questo modo di dimostrare che il batterio può causare l'ulcera peptica. Egli in effetti sviluppò una grave forma di gastrite, ma la dolorosa infiammazione sparì senza alcun trattamento.

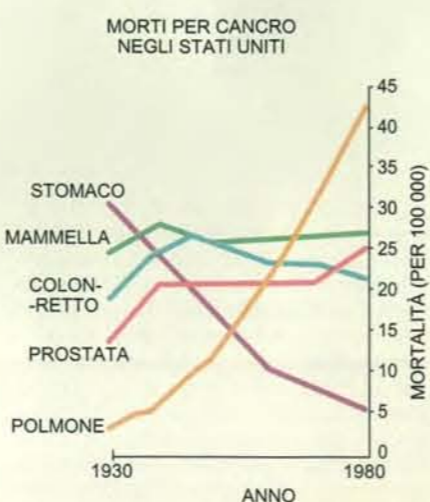
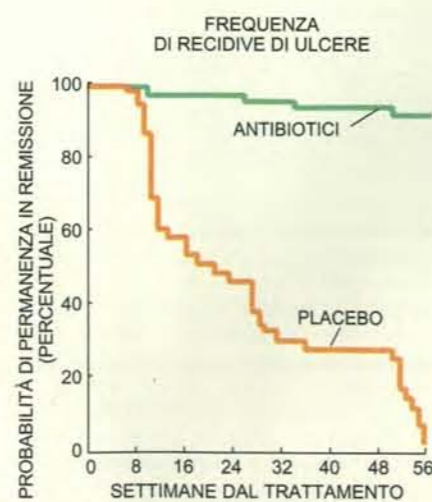
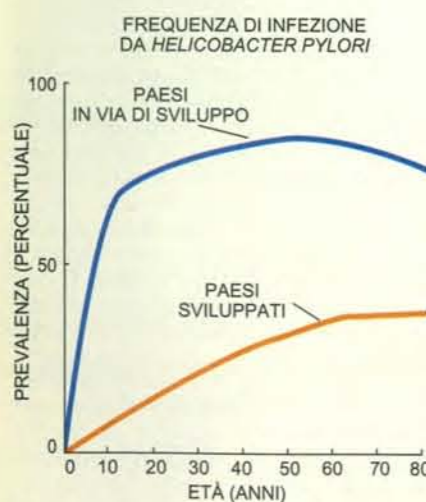
Due anni dopo Arthur J. Morris e Gordon I. Nicholson, dell'Università di Auckland in Nuova Zelanda, riferirono il caso di un altro volontario che non aveva avuto altrettanta fortuna. Quest'uomo di 29 anni, del tutto sano, mostrò segni di infezione solo per 10 giorni, ma la patologia durò molto più a lungo. Nel sessantasettesimo giorno dall'infezione, il volontario iniziò un trattamento con subsalicilato di bismuto. Una biopsia effettuata cinque settimane dopo indicò che il farmaco aveva agito bene. Ma una seconda biopsia effettuata nove mesi dopo la prima mostrò una recidiva sia dell'infezione sia della gastrite. Solo quando il soggetto ricevette un trattamento con due antibiotici diversi associati a subcitrato di bismuto l'infezione finalmente scomparve, dopo tre anni.

più noto è l'aspirina), spesso usati nel trattamento dell'artrite cronica. Ma i dati disponibili indicano oggi che *H. pylori* è responsabile di quasi tutti i casi di formazione di ulcere che non sono correlati a farmaci. In effetti, quasi tutti i pazienti che presentano ulcere peptiche sono infettati da *H. pylori*, mentre negli Stati Uniti, in un gruppo di controllo confrontabile per età, è infettato solo il 30 per cento degli individui. Quasi tutti i pazienti con ulcere duodenali sono infettati da *H. pylori* in questa sede. Le ricerche dimostrano che la presenza di *H. pylori* e la gastrite cronica aumentano di 3-12 volte il rischio di sviluppo di ulcera peptica nei 10-20 anni successivi all'infezione batterica. La cosa più importante è che disponiamo di farmaci specifici che possono debellare l'infezione da *H. pylori* e la gastrite, riducendo sensibilmente la probabilità di ricadute.

Quando un individuo è esposto a *H. pylori*, il suo sistema immunitario reagisce producendo anticorpi, molecole che hanno la funzione di legarsi agli invasori e neutralizzarli. Essi non eliminano i microrganismi, ma l'analisi del sangue ne rivela la presenza e permette di individuare l'infezione.

Le indagini svolte fino a oggi indicano che da un terzo a metà della popolazione mondiale è portatore di *H. pylori*. Negli Stati Uniti e in Europa occidentale l'infezione è rara nei bambini, mentre oltre il 50 per cento dei sessantenni ospita il batterio. Viceversa, nei paesi in via di sviluppo, dal 60 al 70 per cento dei bambini sotto i dieci anni dà risultati positivi all'analisi, e l'infezione resta comune anche negli adulti. L'infezione da *H. pylori* risulta frequente anche nei bambini che vivono in istituti.

Sebbene sia tuttora poco chiaro in che modo il microrganismo si trasmetta da persona a persona, sembra dimostrato che condizioni igieniche non ottimali e sovraffollamento abitativo favoriscano il processo. Effettivamente il miglioramento delle condizioni di vita in molte parti del mondo durante l'ultimo secolo ha fatto diminuire l'incidenza dell'infezione da *H. pylori* e aumentare l'età media in cui si esso instaura.

Anche il carcinoma gastrico è divenuto meno comune negli ultimi 80 anni. All'inizio del secolo esso era la principale causa di morte legata a tumori negli Stati Uniti e in molti paesi industrializzati, mentre oggi ha perso parecchie posizioni. Le cause del declino di questo tipo di tumore non sono conosciute con certezza, ma si ha ragione di ritenere che la diminuzione dell'incidenza di infezione da *H. pylori* ne sia almeno in parte responsabile.

La frequenza di infezione da *Helicobacter pylori* varia secondo le aree geografiche. Nei paesi sviluppati l'infezione è rara nei bambini, ma la sua prevalenza aumenta con l'età. Nei paesi in via di sviluppo risulta infettato un numero molto maggiore di persone in ogni gruppo di età (*a sinistra*). Confermando il fatto che questa infezione può essere causa di ulcere peptiche, Enno Hentschel e collaboratori dell'Ospedale Hanusch di Vienna hanno scoperto che una terapia antibiotica diminuisce radicalmente la probabilità di sviluppare ulcere duodenali (*al centro*). La riduzione della frequenza di infezione negli Stati Uniti durante questo secolo è stata accompagnata da una diminuzione del numero di morti dovute a carcinoma gastrico (*a destra*), il che fa pensare che l'infezione da *H. pylori* possa in talune circostanze causare il cancro.

Una connessione con il cancro

Negli anni settanta Pelayo Correa, oggi al Medical Center della Louisiana State University, propose che il carcinoma gastrico fosse il risultato di alterazioni dello stomaco che avvengono in un lungo periodo. Nel modello di Correa, lo stomaco normale svilupperebbe dapprima gastrite cronica superficiale per cause ignote (oggi si sa che il responsabile di questa patologia è *H. pylori*). Nella seconda fase - che dura anche decenni - si verificherebbe una degenerazione verso una forma più grave, la gastrite atrofica, che a sua volta condurrebbe a ulteriori alterazioni, fra cui metaplasia e displasia intestinali, condizioni tipicamente precancerose. Il grande dilemma, dalla scoperta di *H. pylori*, è: il batterio può spiegare anche la seconda transizione - da gastrite superficiale a gastrite atrofica e forse a cancro - nel modello di Correa?

Le prime prove che collegavano *H. pylori* e il carcinoma gastrico emersero nel 1991 da tre studi separati, progettati in modo simile e che raggiunsero le stesse conclusioni. Descriverò qui lo studio a cui ho direttamente partecipato, con Abraham Nomura del Kuakini Medical Center di Honolulu. Prima di cominciare bisogna però fare un passo indietro. Nel 1942, un anno dopo l'attacco a Pearl Harbor, il servizio di reclutamento iscrisse nelle liste di arruolamento i giovani americani di discendenza giapponese che si trovavano nelle Hawaii. A metà degli anni sessanta ricercatori delle Hawaii esaminarono un ampio gruppo di questi uomini - quelli nati fra il 1900 e il 1919 - per ottenere informazioni sull'epidemiologia delle affezioni cardiache, del cancro e di altre patologie. Entro la fine degli anni sessanta, essi avevano raccolto una coorte di circa 8000 soggetti, distribuito questionari e prelevato e congelato campioni di sangue. Poi seguirono e controllarono i soggetti per rilevare il manifestarsi di eventuali patologie.

Per molte ragioni, all'epoca in cui iniziammo il nostro studio avevamo informazioni sufficienti solo su 5924 uomini di questo gruppo. Fra essi, tuttavia, 137 (più del 2 per cento) avevano manifestato carcinoma gastrico fra il 1968 e il 1989. Ci concentrammo su 109 di questi pazienti, ciascuno dei quali fu confrontato con un membro sano della coorte. Esaminammo poi i campioni di sangue congelati negli anni sessanta in cerca di anticorpi diretti contro *H. pylori*. Un punto di forza di questo studio era che i campioni erano stati prelevati in media 13 anni prima che ai pazienti venisse diagnosticato il cancro. Con questi risultati in mano, ci siamo posti la domanda critica: vi erano indizi di una preesistente infezione da *H. pylori* associata al carcinoma gastrico? La risposta fu decisamente affermativa. Per gli uomini con una infezione preesistente, la probabilità di sviluppare il cancro durante i 21 anni del periodo di *follow-up* era stata sei volte superiore rispetto agli individui che non mostravano segni di infezione. Limitando l'analisi ai tumori che avevano colpito l'antro pilorico - un'area dove spesso si insedia *H. pylori* - il rischio diventava 12 volte maggiore.

Gli altri due studi, diretti da Julie Parsonnet della Stanford University e da David Forman dell'Imperial Cancer Research Fund di Londra, hanno prodotto risultati simili, pur rivelando un rischio lievemente inferiore. Negli ultimi cinque anni ulteriori indagini epidemiologiche e patologiche hanno confermato l'associazione fra l'infezione da *H. pylori* e il carcinoma gastrico. Nel giugno 1994 la International Agency for Research in Cancer, una branca dell'Organizzazione mondiale della sanità, ha dichiarato *H. pylori* un agente cancerogeno di classe 1 (il valore di massima pericolosità dato agli agenti che possono provocare il cancro). Sembra anche che un tipo poco comune di carcinoma gastrico, il linfoma gastrico, sia causato principalmente da *H. pylori*. Dati recenti indicano che i trattamenti antimicrobici per l'infezione da *H. pylori* possono portare a regressione in un sottogruppo di tumori di questo tipo, uno sviluppo di estremo interesse sia per la medicina clinica sia per la biologia oncologica.

Come si insedia nello stomaco

La maggior parte dei batteri non sopravvive in ambiente acido, ma *H. pylori* non è l'unica eccezione. Dopo la sua scoperta, gli scienziati hanno isolato altri 11 microrganismi dallo stomaco di primati e da quello di cani, gatti, roditori, mustelidi e persino ghepardi. Questi batteri, per il momento considerati membri della famiglia di *Helicobacter*, sembrano avere un antenato comune. Hanno forma a spirale e sono altamente mobili (in quanto nuotano bene), proprietà che consentono loro di resistere alle contrazioni muscolari che provvedono regolarmente allo svuotamento dello stomaco. Il livello di ossigeno più favorevole per la loro crescita è intorno al 5 per cento, ossia quello presente nello strato di muco dello stomaco (l'atmosfera contiene il 21 per cento di ossigeno). Oltre a ciò, questi microrganismi sintetizzano grandi quantità di ureasi, un enzima che scinde l'urea in ammoniaca e anidride carbonica. La produzione di ammoniaca può essere una delle strategie con cui questi batteri neutralizzano localmente l'acidità per favorire la propria sopravvivenza.

Un problema interessante riguarda le modalità con cui *H. pylori* si nutre. Vi sono due ipotesi ovvie: il muco in cui esso vive e il cibo ingerito dall'ospite umano. Ma Denise Kirschner della Texas A&M University e io abbiamo messo a punto un modello matematico che dimostra come *H. pylori* non riuscirebbe a sopravvivere per molti anni se si basasse su queste fonti di sostanze nutritive. Secondo il nostro modello, la persistenza nello stomaco richiede un'interazione regolata fra le cellule dell'ospite e il batterio. L'infiammazione è un possibile tipo di interazione, cosicché ho proposto che *H. pylori* possa indurre infiammazione allo scopo di acquisire sostanze nutritive. Un apparente paradosso della biologia di *H. pylori* è che, sebbene il microrganismo non invada il tessuto gastrico, può cau-

Cortesia Arthur J. Morris, Gordon I. Nicholson e Martin J. Blaser

Questi microrganismi ricurvi, ingranditi 8000 volte, sono esemplari di *Helicobacter pylori* individuati nello stomaco del secondo volontario umano che ingerì il batterio. L'introduzione del microrganismo nel soggetto era avvenuta 463 giorni prima di questo esame e la conseguenza era stata la comparsa di gastrite cronica superficiale.

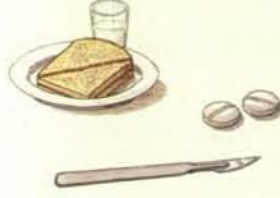
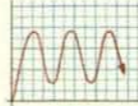
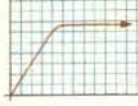
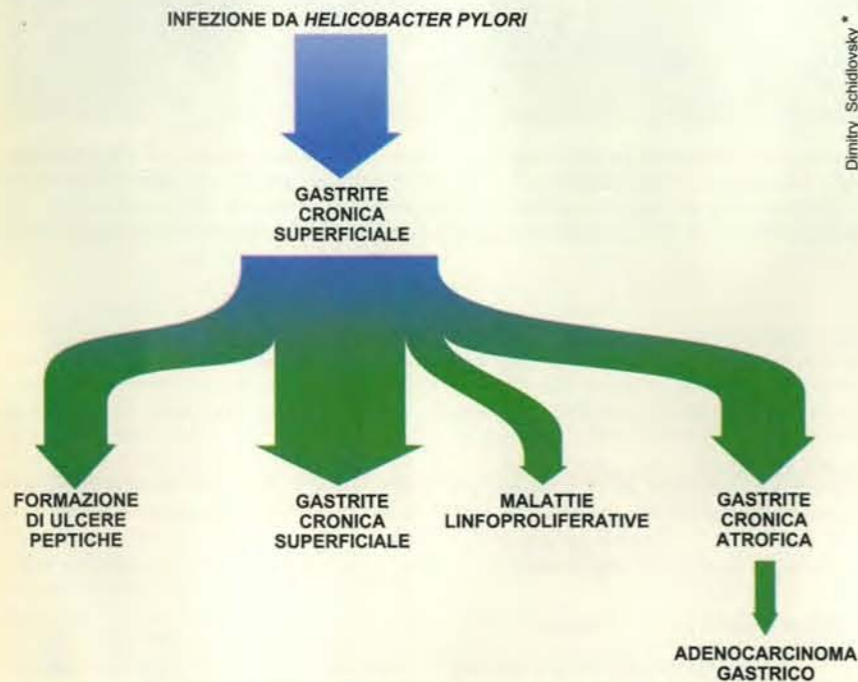
sarvi irritazione; come è stato scoperto da noi e da altri, i batteri liberano sostanze chimiche che possono attraversare la mucosa gastrica. Questi composti attraggono i fagociti, come leucociti e macrofagi, che inducono la gastrite.

L'ospite non è del tutto passivo mentre *H. pylori* lo bombarda di sostanze nocive. L'organismo umano dà inizio a una reazione immunitaria, producendo anticorpi diretti contro il microrganismo. Questa risposta, però, non è molto efficace perché l'infezione e gli anticorpi quasi inevitabilmente coesistono per decenni. Probabilmente, messo a contatto con un agente patogeno che non poteva essere distrutto con facilità, l'organismo umano ha dovuto scegliere tra due opzioni: evolversi per combattere *H. pylori* fino a debellarlo, forse alterando drasticamente la normale funzione gastrica, o diventare tollerante e cercare di ignorare il microrganismo. Ritengo che la scelta evolutiva sia caduta sulla tolleranza. La risposta ad altri agenti patogeni persistenti - come quelli responsabili della malaria e della lebbra - potrebbe aver seguito le stesse modalità, secondo le quali il miglior adattamento per l'ospite consiste nel limitare la risposta immunitaria.

Fortunatamente, non è nell'interesse di *H. pylori* approfittare troppo di questa passività, fino a proliferare al punto di uccidere l'ospite. In primo luogo, ciò limiterebbe le possibilità di diffusione dell'infezione; inoltre, anche nel suo stato stazionario, *H. pylori* si moltiplica fino a raggiungere un numero cospicuo di organismi nello stomaco (da 10^7 a 10^{10} cellule). Infine, un'ulteriore proliferazione potrebbe neutralizzare i meccanismi che tengono a freno il sistema immunitario, portando a grave infiammazione, gastrite atrofica e, infine, riduzione dell'acidità gastrica. Quando la secrezione gastrica è ridotta, i batteri intestinali come *Escherichia coli* sono liberi di risalire a colonizzare lo stomaco. Sebbene *H. pylori* possa vivere più a lungo di *E. coli* in ambiente acido, questo si sviluppa fino a scacciare *H. pylori* in condizioni più neutre. Per evitare quindi la competizione con i batteri intestinali, *H. pylori* non deve causare un'infiammazione così intensa da alterare profondamente il *p*H gastrico.

È possibile che *H. pylori* sia un simbionte solo recentemente trasformatosi in organismo patogeno? Oppure un patogeno in cammino verso la simbiosi? Non lo sappiamo ancora, ma possiamo apprendere parecchie cose dalla biologia di *Mycobacterium tuberculosis*, l'agente responsabile della tubercolosi. Anch'esso infetta circa un terzo della popolazione mondiale, ma, come accade per l'infezione da *H. pylori*, solo il 10 per cento circa delle persone infettate si ammala nel corso dell'esistenza; il restante 90 per cento non mostra mai alcun sintomo. Le possibili spiegazioni ricadono in diverse categorie. Le differenze fra i ceppi batterici o fra gli ospiti potrebbero spiegare perché alcune persone infettate sviluppano la malattia mentre altre non lo fanno. Cofattori ambientali, come la qualità dell'alimentazione o il fatto che il soggetto fumi, possono influenzare il decorso dell'infezione, e l'età a cui si acquisisce l'infezione può modificare il rischio che si manifesti la malattia. Ciascuna di queste categorie influenza l'esito dell'infezione da *H. pylori*, ma nel seguito tratterò soprattutto delle differenze fra i vari ceppi di microrganismi.

Non tutti i batteri nascono uguali

Data la sua abbondanza in tutto il mondo, non stupisce che *H. pylori* sia altamente differenziato a livello genetico. I vari ceppi condividono molte caratteristiche strutturali, biochimiche e fisiologiche, ma non sono tutti egualmente virulenti. Le differenze sono legate a variazioni di due geni. Uno di questi codifica per una grossa proteina sintetizzata dal 60 per cento dei ceppi. Un gruppo della Vanderbilt University, comprendente Murali Tummuru, Timothy L. Cover e me e un gruppo italiano della Biocine, diretto da Antonello Covacci e Rino Rappuoli, hanno quasi simultaneamente identificato e clonato il gene nel 1993 e di comune accordo lo hanno denominato *cagA*. Mentre circa la metà dei pazienti affetti da sola gastrite cronica superficiale è infettata da ceppi di *H. pylori* che possiedono il gene *cagA*, quasi tutti gli individui con ulcere duodenali ospitano ceppi *cagA*. Recentemente abbiamo riesaminato i risultati dello studio condotto nelle Hawaii e abbiamo trovato che l'infezione dovuta a un ceppo *cagA* era associata a un rischio doppio di carcinoma gastrico. Ricerche condotte da Jean E. Crabtree dell'Università di Leeds in Inghilterra e dal gruppo della Vanderbilt University hanno dimostrato che le persone infettate da ceppi *cagA* soffrono di infiammazioni e lesioni tissutali più gravi di quelle infettate da ceppi privi di questo gene.

L'altro gene di *H. pylori* che sembra avere effetti patologici particolarmente rilevanti codifica per una tossina. Nel 1988 Robert D. Leunk, che lavorava per la Procter&Gamble - produttrice del subsalicilato di bismuto - riferì che una miscela liquida contenente *H. pylori* poteva indurre la formazione di vacuoli in colture di tessuti. Nel mio gruppo, Cover aveva dimostrato che responsabile di questo danno era una tossina prodotta non solo dai batteri coltivati in laboratorio, ma anche da quelli residenti negli ospiti umani. Nel 1991 abbiamo purificato la tossina confermando l'osservazione di Leunk secondo cui solo il 50-60 per cento dei ceppi di *H. pylori* la sintetizza. Il nostro articolo fu pubblicato nel maggio 1992 e comprendeva una breve sequenza di alcuni dei nucleotidi che codificano per la tossina. Basandosi su queste poche informazioni, entro un anno quattro gruppi di ricerca - due negli Stati Uniti, compreso il nostro, uno in Italia e uno in Germania - riuscirono a clonare il gene, che fu battezzato di comune accordo *vacA*. Vi fu una vera corsa alla pubblicazione: ciascuno dei quattro articoli comparve in riviste diverse in un periodo di tre mesi.

L'infezione da *H. pylori* progredisce a gastrite cronica superficiale in alcuni mesi e, se non curata, persiste per tutta la vita nella maggior parte dei soggetti. Una piccola frazione delle persone colpite può però sviluppare ulcera peptica, malattie linfoproliferative o grave gastrite cronica atrofica, che può condurre ad adenocarcinoma gastrico.

Quale strategia di trattamento scegliere?

	VECCHIO MODELLO	NUOVO MODELLO
CAUSA	**L'eccessiva acidità gastrica** danneggia i tessuti e causa infiammazione	***Helicobacter pylori*** secerne tossine che causano infiammazione gastrica e conseguenti lesioni tissutali
TRATTAMENTI	**Alimentazione leggera**, con latticini assunti ogni ora, piccoli pasti, niente agrumi e cibi piccanti, niente alcool e caffeina **I bloccanti del recettore H_2** riducono i livelli ematici di istamina, la quale aumenta la secrezione gastrica **Intervento chirurgico** per rimuovere le ulcere che non rispondono alla terapia o danno origine a emorragie incontrollabili. Negli anni settanta era l'intervento più comune, ora è sempre più raro	**Trattamento con antibiotici**. Nel mese di febbraio 1994 un comitato dei NIH ha raccomandato un trattamento antibiotico della durata di due settimane per l'ulcera peptica: amoxicillina o tetraciclina, metronidazolo e subsalicilato di bismuto. Nel dicembre 1995 un comitato di consulenza della FDA ha sollecitato l'approvazione di due nuovi trattamenti della durata di quattro settimane, che associano claritromicina con omeprazolo o in alternativa ranitidina e bismuto citrato. Anche terapie di una settimana sono assai efficaci.
SUCCESSO	I pazienti che smettono di assumere i bloccanti del recettore H_2 hanno una probabilità del **50 per cento di recidiva** dell'ulcera entro sei mesi e del 95 per cento di recidiva entro due anni	**Non si ha recidiva** dopo l'eliminazione dell'infezione batterica
COSTO	I bloccanti del recettore H_2 costano da 60 a 100 dollari al mese **(90-160 000 lire)** e devono essere assunti per decine di anni. L'intervento chirurgico può costare fino a 18 000 dollari (quasi 30 milioni di lire)	**Meno di 200 dollari** (circa 300 000 lire) per una terapia standard di una settimana

Roberto Osti (disegni), Lisa Burnett *

Non si è trattato di un lavoro inutilmente ripetuto: ciascun gruppo ha risolto un aspetto differente del problema. Per esempio noi abbiamo appreso che pressoché tutti i ceppi di *H. pylori* possiedono *vacA*, che producano o meno la tossina quando vengono fatti crescere in coltura. Abbiamo anche scoperto che vi è una variabilità straordinaria, da ceppo a ceppo, nello stesso gene *vacA*. Oltre a ciò, un estratto di ceppi produttori di tossina inoculato direttamente nello stomaco di topi produceva considerevoli lesioni. I ceppi che sintetizzano la tossina sono sovrarappresentati del 30-40 per cento nei pazienti con ulcere rispetto a quelli che soffrono solo di gastrite. Inoltre i ceppi produttori di tossina di solito contengono *cagA*, localizzato assai lontano da *vacA* sul cromosoma.

Batteri ad azione lenta e malattie

Negli ultimi 15 anni si è scoperto molto su *H. pylori*. Queste conoscenze hanno rivoluzionato la nostra comprensione della gastrite, in precedenza ritenuta legata al deterioramento del tessuto gastrico, nonché della formazione di ulcere peptiche e del carcinoma gastrico; hanno anche reso possibili nuovi trattamenti e metodi di *screening*. Oltre a ciò, è emerso un nuovo campo di studi - quello della microbiologia e immunologia dello stomaco umano - che indubbiamente farà luce su svariate altre infezioni persistenti delle mucose.

Proviamo a trarre ulteriori conclusioni da questi risultati: un batterio ad azione lenta, *H. pylori*, causa un processo infiammatorio cronico, l'ulcera peptica, in precedenza considerata di origine metabolica; questa infezione aumenta fortemente il rischio di sviluppo di neoplasie quali adenocarcinomi e linfomi. Sembra perciò ragionevole proporre che organismi infettivi persistenti possano essere coinvolti nell'eziologia di altre malattie infiammatorie croniche. Tra queste vi potrebbero essere la colite ulcerosa, il morbo di Crohn (o enterite regionale), la sarcoidosi, la granulomatosi di Wegener, il lupus eritematoso sistemico e la psoriasi, oltre a varie neoplasie, fra le quali i carcinomi del colon, del pancreas e della prostata. Ritengo che *H. pylori* sia molto probabilmente il primo rappresentante di una classe di batteri ad azione lenta che potrebbero spiegare numerose malattie enigmatiche che oggi ci troviamo a combattere.

MARTIN J. BLASER, già alla Rockefeller University e all'Università del Colorado, è dal 1989 direttore del Reparto di malattie infettive alla Vanderbilt University e al Nashville Veterans Affairs Medical Center. Ha ricevuto lauree *honoris causa* in economia dall'Università della Pennsylvania (1969) e in medicina dalla New York University (1973) ed è autore di più di 300 articoli scientifici.

MARSHALL BARRY J. e WARREN ROBIN J., *Unidentified Curved Bacilli in the Stomach of Patients with Gastritis and Peptic Ulceration* in «Lancet», n. 8390, 16 giugno 1984.

NOMURA A., STEMMERMANN G. N., CHYOU P.-H., KATO I., PEREZ-PEREZ G. I. e BLASER M. J., *Helicobacter Pylori Infection and Gastric Carcinoma Among Japanese Americans in Hawaii* in «New England Journal of Medicine», 325, n. 16, 17 ottobre 1991.

CORREA PELAYO, *Human Gastric Carcinogenesis: A Multistep and Multifactorial Process* in «Cancer Research», 52, n. 24, 15 dicembre 1992.

HENTSCHEL ENNO e altri, *Effect of Ranitidine and Amoxicillin plus Metronidazole on the Eradication of Helicobacter pylori and the Recurrence of Duodenal Ulcer* in «New England Journal of Medicine», 328, n. 5, 4 febbraio 1993.

WOTHERSPOON A. C. e altri, *Regression of Primary Low-Grade B-Cell Gastric Lymphoma of Mucosa-Associated Lymphoid Tissue Type after Eradication of Helicobacter pylori* in «Lancet», 342, n. 8871, 4 settembre 1993.

BLASER MARTIN J. e PARSONNET JULIE, *Parasitism by the "Slow" Bacterium Helicobacter pylori Leads to Altered Gastric Homeostasis and Neoplasia* in «Journal of Clinical Investigation», 94, n. 1, luglio 1994.

Il calcolatore nello studio dei quark

Anni di calcoli hanno contribuito a confermare la teoria dei quark e, sfruttandone i princìpi, hanno anche consentito di identificare una nuova particella

di Donald H. Weingarten

Nell'apprendere che un supercalcolatore ha lavorato per anni di seguito per fornire una decina di risultati, alcuni potrebbero manifestare un certo compatimento, ma per me e i miei collaboratori è stato tempo ben speso. I compiti assegnati alla macchina erano così complicati che non era possibile eseguirli a mano, ma dato che riguardavano problemi fondamentali della teoria delle particelle elementari, ci sembrò ragionevole affrontare calcoli che sarebbero durati alcuni anni.

I problemi a cui mi riferisco nascono dalla cromodinamica quantistica (QCD), la teoria che spiega il comportamento dei quark. Formulata negli anni settanta, la QCD descrive il modo in cui due o tre quark si combinano per formare gli adroni, cioè le particelle soggette all'interazione nucleare forte. Alla famiglia degli adroni appartengono il protone e il neutrone, oltre a particelle più esotiche che fanno una fugace comparsa nelle collisioni ad alta energia all'interno degli acceleratori oppure nei raggi cosmici. Esperimenti allestiti per sondare la struttura interna degli adroni mediante diffusione di elettroni hanno già fornito dati preliminari che sembrano indicare la correttezza della QCD, teoria che oggi costituisce uno dei fulcri del modello standard della fisica delle particelle.

Mancava tuttavia una conferma importante: per essere la teoria fondamentale dei quark, la QCD dovrebbe permettere di calcolare la massa del protone e del neutrone, anzi di qualsiasi adrone. (Naturalmente la massa di molti adroni è già stata misurata per via sperimentale; quella del protone e del neutrone, per esempio, fu trovata agli inizi del secolo.) Ma i calcoli necessari per ricavare queste masse dalla teoria erano troppo complessi per poter essere eseguiti a mano, e anche per i calcolatori più veloci degli anni settanta sarebbe occorso un secolo di lavoro ininterrotto.

Questo fu il motivo per cui, nel 1983, con i miei colleghi del Thomas J. Watson Research Center dell'IBM, intrapresi il progetto di un calcolatore parallelo da adibire unicamente ai calcoli della QCD. La macchina avrebbe effettuato circa 11 miliardi di operazioni aritmetiche al secondo e sarebbe quindi stata molte centinaia di volte più potente dei più veloci calcolatori dell'epoca. (Il progresso ha poi reso meno impressionante questa velocità, che corrisponde ormai a quella complessiva di circa 200 calcolatori da tavolo dotati del chip Pentium più avanzato.)

Nel 1991, dopo otto anni di progettazione, finanziamento e costruzione, potemmo iniziare i calcoli. Occorse un anno circa di funzionamento ininterrotto perché il calcolatore, chiamato GF11, fornisse i primi risultati, tra cui una stima della massa del protone e di altri sette adroni. La differenza tra le nostre previsioni e i risultati sperimentali non superava il 6 per cento ed era dovuta più alla natura statistica dell'algoritmo usato che all'imprecisione intrinseca della QCD.

Nel novembre 1995 terminammo una seconda serie di calcoli, che avevano impegnato la macchina ininterrottamente per due anni. Il calcolatore ricavò la massa e la velocità di decadimento di un'elusiva particella subnucleare appartenente a una sottofamiglia di adroni denominati *glueball* (ossia «grumi di colla). Sfruttando questi dati e confrontandoli con risultati sperimentali precedenti, scoprimmo che in realtà la particella era già comparsa in esperimenti di laboratorio, ma non era stata riconosciuta. Questo calcolo di QCD rappresenta dunque il primo caso in cui un uso intensivo del calcolatore ha portato all'identificazione di una nuova particella.

Di conseguenza pensiamo che il nostro lavoro sulla massa degli adroni e su massa e velocità di decadimento della glueball costituisca una conferma significativa della QCD. Le nostre ricerche, inoltre, forniscono un esempio di come potrebbero essere affrontati in futuro i problemi della fisica di base. Il costo degli acceleratori di particelle e la complessità della teoria si alleano nel limitare le nostre indagini della natura, sicché il ricorso su ampia scala al calcolo numerico potrebbe essere il mezzo per risolvere problemi cui non ci si può accostare per altra via.

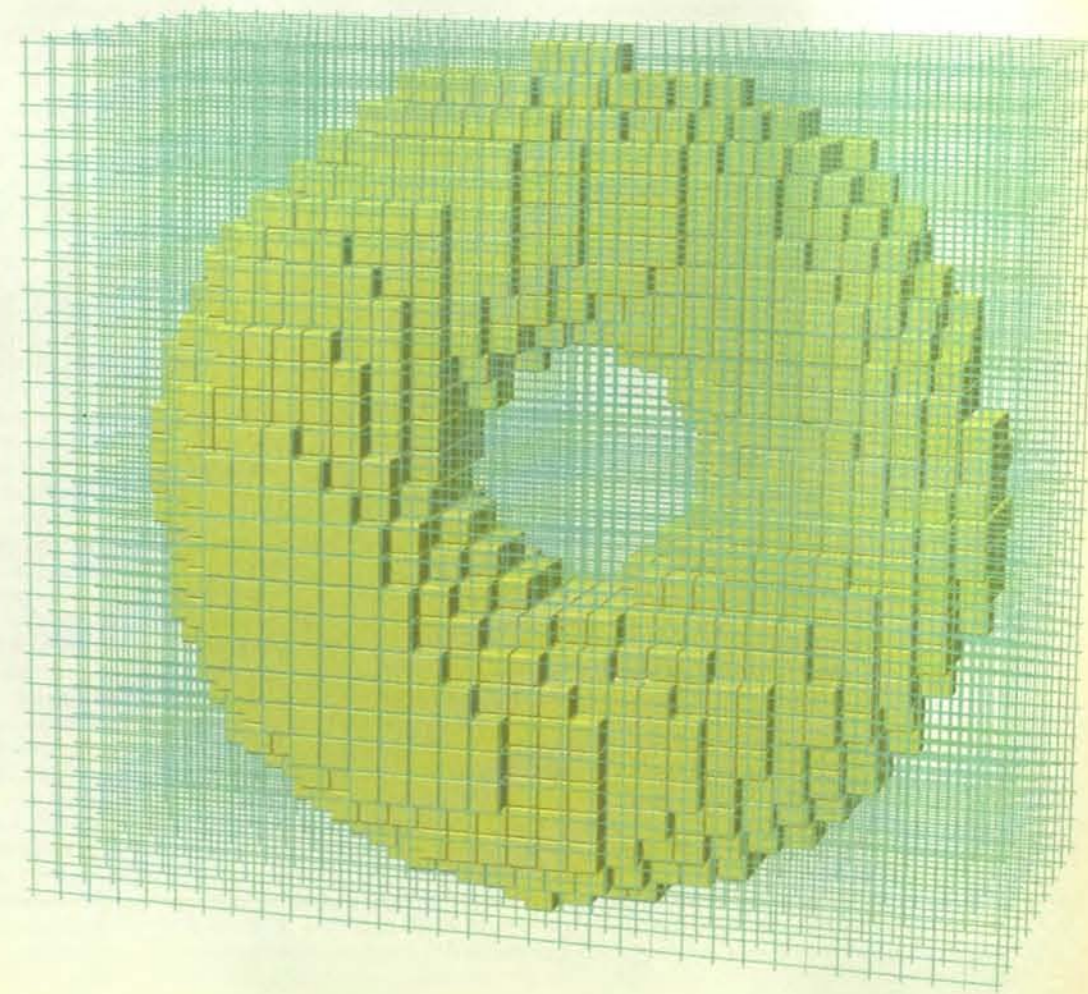
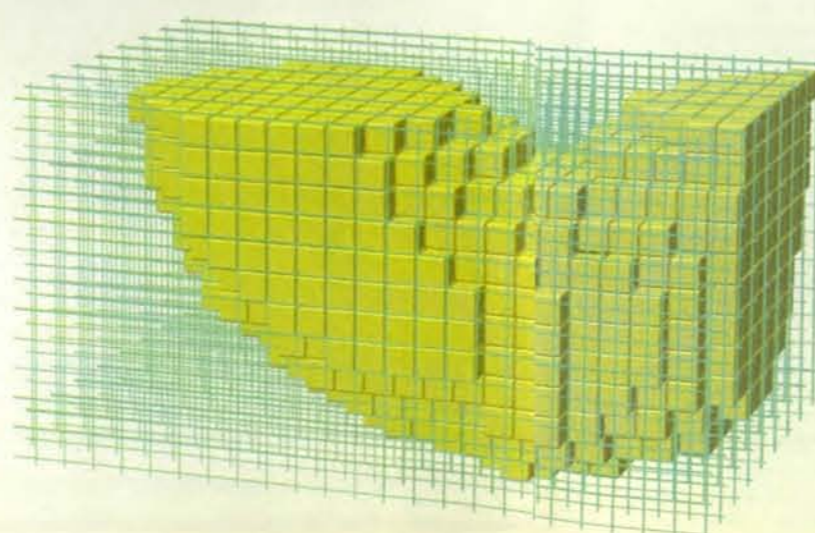
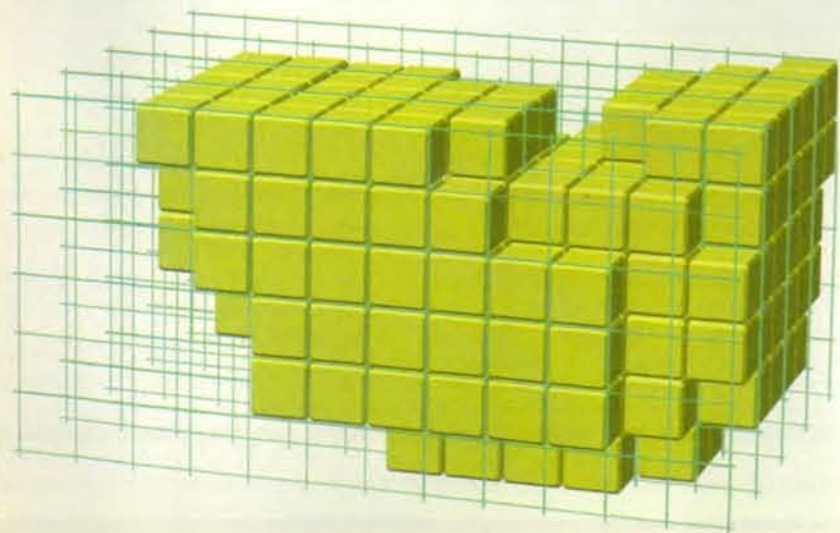
Perché il comportamento dei quark è tanto complesso? Uno dei motivi è la varietà dei modi in cui essi si possono combinare. I quark si presentano con sei «sapori»: up (su), down (giù), strange (strano), charm (incantato), top (alto) e bottom (basso). Inoltre possono assumere tre colori, chiamati cariche cromatiche e indicati spesso con rosso, verde e blu. Quindi sono possibili 18 combinazioni diverse di caratteristiche. Oltre a ciò esistono gli antiquark, con le loro 18 corrispondenti combinazioni di antisapori e anticolori. Stando alla QCD, i singoli quark o antiquark non possono presentarsi allo stato libero: perciò i fisici ne deducono le proprietà osservando le interazioni tra coppie di adroni e tra adroni e altre particelle elementari, per esempio elettroni e fotoni.

Ma ciò che conferisce alla QCD la sua complessità è soprattutto il fatto che le cariche cromatiche generano una sacca di energia chiamata campo elettrocromatico. Le cariche cromatiche dei quark, perciò, assomigliano alle cariche elettriche ordinarie, che creano intorno a sé un campo elettromagnetico. E come un campo elettromagnetico lega gli elettroni, di carica negativa, al nucleo atomico, di carica positiva, così il campo elettrocromatico lega tra loro quark e antiquark nell'interno degli adroni. (Prima dell'annichilazione reciproca materia e antimateria possono coesistere per brevi istanti.) Quindi la QCD può render conto di tutta una gamma di possibili adroni, derivanti dalle varie combinazioni e disposizioni dei 36 tipi diversi di quark e antiquark.

L'analogia tra un campo elettromagnetico ordinario e un campo elettrocromatico finisce qui. A differenza del campo elettromagnetico, infatti, il campo elettrocromatico può manifestare una forte interazione con se stesso e generare diversi tipi di grumi condensati. All'interno di un adrone il campo condensa in una forma sottile e intensa, simile a una corda, nella quale si concentra una porzione cospicua della massa totale della particella: è questo il motivo principale per cui la massa di un adrone non si può ricavare semplicemente sommando le masse dei quark che esso contiene. Questa autointerazione forte del campo elettrocromatico costituisce, in ultima analisi, la principale difficoltà che si oppone alla valutazione delle masse adroniche con la QCD.

Queste componenti a forma di corda del campo elettrocromatico possono anche formare un cappio chiuso, dando così luogo, in base alla QCD, a una par-

Una griglia spaziotemporale è usata nei calcoli della cromodinamica quantistica (QCD) reticolare. Per poter approssimare la realtà, i calcoli vengono eseguiti per reticoli sempre più densi e più grandi, accrescendo così la precisione complessiva della rappresentazione (in questo caso una ciambella).

Michael Goodman

Il supercalcolatore GF11 comprende 566 unità di elaborazione parallele. Il «permutatore» raccoglie i dati e li trasmette alle diverse unità, mentre il controllore coordina tutta l'attività. Nella fotografia le unità di elaborazione sono i pannelli scorrevoli color rame che rientrano nelle scaffalature; i cavi fanno parte del sistema permutatore-controllore.

IBM Thomas J. Watson Research Center

Michael Goodman

ticella senza quark e antiquark. Poiché il campo elettrocromatico «incolla» tra loro gli adroni costituiti da quark, le particelle fatte solo di campo sono dette glueball.

Per fare previsioni sulla base di queste idee generali relative alla QCD è necessaria un'interpretazione matematica più specifica del comportamento dei quark e del campo elettrocromatico. Tutti i metodi numerici (algoritmi per calcolatore) che sono stati finora applicati ai calcoli di QCD si basano su una formulazione della teoria proposta nel 1974 da Kenneth G. Wilson, attualmente alla Ohio State University.

L'approccio di Wilson è alquanto tecnico. In breve, la sua versione della QCD può essere considerata una descrizione della variazione nel tempo della configurazione dei quark e del campo elettrocromatico. Per esempio una possibile configurazione, osservata a mezzogiorno, potrebbe consistere in un quark che si sposta alla velocità di un chilometro all'ora verso un altro quark con cui entra in collisione, mentre il campo elettrocromatico è nullo in tutti i punti dello spazio. Un'altra configurazione, osservata - diciamo - alle due del pomeriggio, potrebbe consistere nei due quark di prima che si propagano in direzioni opposte, a 90 gradi rispetto alle loro traiettorie originali, mentre il campo elettrocromatico è diverso da zero in alcuni punti dello spazio. La formulazione di Wilson della QCD assegna una probabilità alla transizione tra le due configurazioni. Per ricavare dalla QCD previsioni quantitative, è necessario analizzare queste probabilità di transizione con una certa abilità matematica.

La formulazione di Wilson si applica a un mondo piuttosto insolito: lo spazio continuo e illimitato e il tempo della realtà sono infatti approssimati mediante un reticolo discreto, costituito da punti simili ai vertici di una scacchiera quadridimensionale (tre dimensioni per lo spazio e una per il tempo). Questa impalcatura è limitata a un volume finito e di conseguenza tutto lo spazio e tutto il tempo sono approssimati con una griglia finita di punti. In ciascuno di questi punti si ha una configurazione specifica di quark e di campo elettrocromatico. La versione di Wilson della teoria si chiama, per ovvie ragioni, QCD reticolare.

Si postula che i risultati relativi al mondo reale si ottengano eseguendo i calcoli per una successione di reticoli in cui la spaziatura tra i vertici è via via minore e il volume del reticolo via via maggiore (in altri termini si fa tendere a zero la distanza tra i nodi del reticolo e all'infinito il suo volume). Il limite di questa successione di risultati rappresenta la previsione fornita dalla QCD reticolare per il mondo reale.

Quanto ai calcoli, la regola di Wilson per determinare la probabilità di una transizione presenta un problema, dato che è necessario sommare un numero enorme di termini. La somma comprende infatti un addendo per ciascun modo possibile di costruire una certa tabella a due colonne. In linea di principio la tabella dovrebbe riportare in una colonna tutti i punti del reticolo e nell'altra la configurazione dei quark e del campo relativa a ciascun punto.

Il numero di modi diversi di introdurre in questa tabella informazioni relative alle configurazioni in effetti è astronomico. In ciascun vertice del reticolo il campo elettrocromatico è rappresentato da un insieme di 32 numeri reali. Per un reticolo con 10 punti per ogni dimensione (10 × 10 × 10 × 10, la grandezza minima necessaria per ottenere una rappresentazione della realtà, per quanto rozza), una tabella che riporti il campo in ogni punto contiene 320 000 numeri reali (32 numeri per ciascuno dei 10 000 nodi del reticolo). Anche ignorando l'ulteriore complicazione rappresentata dalla necessità di seguire le traiettorie dei quark e introducendo la semplificazione poco realistica che ciascuno dei 320 000 numeri possa essere solo 0 o 1, ciascuna tabella fornirebbe una successione di 320 000 cifre binarie. Le successioni di questo tipo (e quindi i termini possibili della somma di Wilson) sono quindi 2 elevato a 320 000, che vale circa 1 seguito da 96 000 zeri.

Nel 1979 Michael J. Creutz, Laurence A. Jacobs e Claudio Rebbi, allora al Brookhaven National Laboratory, seguendo in parte un suggerimento di Wilson, proposero un pratico metodo numerico per evitare questi calcoli sterminati. Il loro metodo è una variante dell'integrazione alla Montecarlo, che consente di approssimare la soluzione di un problema complesso mediante un campionamento statistico, come quando si fa un sondaggio per prevedere i risultati delle elezioni.

Invece di eseguire la somma completa dell'enorme insieme di tutte le possibili configurazioni del reticolo, se ne ricava una stima tramite un procedimento di campionatura, prendendo in esame un insieme molto più piccolo di termini tipici scelti a caso. Per valutare in questo modo un reticolo di 10 unità bastano circa 20 miliardi di operazioni aritmetiche. Nel 1979 un calcolatore di buona potenza era in grado di eseguire circa mezzo milione di operazioni aritmetiche al secondo, sicché il metodo Montecarlo poteva fornire un'approssimazione piuttosto precisa in meno di una giornata.

Purtroppo l'impegno di calcolo appariva accettabile perché si applicava a una forma semplificata di QCD, che teneva conto del campo elettrocromatico, ma ignorava i quark. L'applicazione di un calcolo analogo alla teoria completa comportava una serie di problemi tecnici. Nel 1981 vari gruppi di ricercatori - tra cui Donald N. Petcher e io (allora all'Università dell'Indiana) e Federico Fucito, Enzo Marinari e Giorgio Parisi dell'Università «La Sapienza» di Roma (che lavoravano con Rebbi) - proposero versioni dell'algoritmo Montecarlo che tenevano conto dei quark. Gli algoritmi riveduti includevano una misura della difficoltà che quark e antiquark avrebbero incontrato nel passare dalla configurazione iniziale a quella finale.

Il prezzo che si dovette pagare per introdurre quark e antiquark negli algoritmi riveduti fu un cospicuo aumento del numero di operazioni aritmetiche da eseguire per compiere calcoli significativi. Anche i calcolatori più veloci dell'epoca non avrebbero potuto elaborare in un tempo ragionevole dati relativi a reticoli abbastanza grandi da fornire previsioni sul mondo reale. Nessuno poteva aspettare i 100 anni che sarebbero occorsi per portare a termine i calcoli.

Questo ostacolo nasceva da un ulteriore contributo all'energia di ciascuna configurazione di quark e campo elettrocromatico. L'energia addizionale deriva dalla rapida creazione e annichilazione di coppie quark-antiquark, un fenomeno che si presenta in tutte le regioni dello spazio dove ha sede un campo elettrocromatico.

Per compensare questo effetto, nel 1981 proposi una tecnica chiamata approssimazione di valenza, che consiste nel sopprimere il contributo delle coppie quark-antiquark e nel dividere tutte le cariche cromatiche per una costante «cromodielettrica». Scoprimmo che, per calcolare nell'approssimazione di valenza il limite della massa prevista quando la distanza tra i vertici tende a zero e il volume all'infinito, occorreva lavorare con reticoli la cui grandezza arrivasse fino a 32 unità per ciascuna dimensione. Un calcolo completo richiede in totale circa 10^{17} operazioni aritmetiche.

I calcolatori più veloci dei primi anni ottanta potevano eseguire circa 40 milioni di operazioni aritmetiche al secondo, cioè 10^{15} operazioni all'anno: anche con l'approssimazione di valenza, per calcolare le masse degli adroni sarebbero occorsi 100 anni. Pertanto l'insufficiente potenza dei calcolatori impediva ai ricercatori di ricavare dalla QCD reticolare tutta la possibile messe di previsioni sul mondo reale.

Nel 1983, con Monty Denneau e John Beetem, miei colleghi alla IBM, cominciai a progettare un calcolatore da adibire ai calcoli di QCD. Doveva essere capace di eseguire 11 miliardi di operazioni aritmetiche al secondo, precisamente 11 miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo, cioè 11 gigaflop (da cui la sigla del calcolatore, GF11): una velocità 250 volte superiore a quella delle migliori macchine dell'epoca. Per raggiungere una simile velocità di calcolo avremmo impiegato 566 unità di elaborazione funzionanti in parallelo. Il ciclo di macchina (ossia il tempo impiegato da un'unità di elaborazione per eseguire un'addizione o una moltiplicazione) era di 50 nanosecondi. Ciascuna unità, capace di 20 megaflop, poteva fornire alle altre un dato ogni 200 nanosecondi. (Oggi esistono decine di supercalcolatori più veloci del GF11: i più potenti fra questi sono forse 10 volte più veloci.)

James C. Sexton e io scrivemmo il sistema operativo, un compilatore e un insieme di programmi di diagnostica per l'hardware. Cominciammo a far funzionare la macchina in collaborazione con un gruppo diretto da David George e comprendente Michael Cassera, Molly Connors, Manoj Kumar, Edward Nowicki e Michael Tsao. Sexton, Chi-Chai Huang, Lan Wong e io effettuammo la messa a punto definitiva del GF11.

Verso la fine del 1991 Sexton e io, con i colleghi Frank Butler, Hong Chen e Alessandro Vaccarino, potemmo iniziare il calcolo delle masse adroniche. Cercavamo la massa di 11 adroni formati solo da combinazioni dei tre sapori più leggeri di quark e antiquark: up,

La QCD con il metodo Montecarlo

Per evitare l'enorme mole di calcoli che sarebbero richiesti dalla QCD reticolare, si può sfruttare la scorciatoia del metodo Montecarlo. Con questa tecnica si possono trovare le «ampiezze di transizione», cioè le probabilità che i quark e il campo elettrocromatico passino da un particolare stato di partenza a un determinato stato finale. Un'analogia terra terra è fornita dal lancio di un dado: in questo caso l'ampiezza di transizione non è altro che la probabilità che il dado si fermi mostrando una determinata faccia. Il punto è che nella QCD il dado è truccato, ma non si sa quale sia la faccia più pesante. Inoltre il risultato del lancio dipende dall'orientazione iniziale del dado e da quanto esso venga scosso prima di essere tratto.

Il metodo Montecarlo consiste nel lanciare il dado e vedere che cosa succede, come si fa nel gioco d'azzardo (da qui il nome del metodo). Per trovare l'ampiezza di transizione, per esempio, tra la posizione corrispondente a 1 e la posizione corrispondente a 6 un minuto dopo, all'inizio si tiene il dado con la faccia 1 rivolta verso l'alto, lo si scuote per un po', poi lo si lancia in modo che si arresti un minuto dopo e si controlla se è venuto 6. Quest'operazione viene ripetuta parecchie volte. La frazione di lanci in cui il dado mostra la faccia 6 fornisce la probabilità di transizione voluta.

Per trovare l'ampiezza di transizione per la QCD, si fa qualcosa di molto simile. Dapprima si specifica la configurazione desiderata del campo all'istante iniziale (ciò corrisponde a tenere il dado in mano con una certa orientazione); poi il calcolatore crea una successione aleatoria di campi lungo la dimensione temporale del reticolo (cioè il dado viene scosso) e all'istante finale prestabilito si arresta su un certo campo (il dado viene lanciato). A questo punto si osserva l'esito per stabilire se si tratta della configurazione finale desiderata (si controlla se è venuto 6). La frazione di tentativi che portano alla configurazione finale voluta fornisce l'ampiezza di transizione che si desidera. Una volta trovata l'ampiezza di transizione, con un po' di calcoli si possono determinare le masse adroniche effettive.

I lanci di un dado danno un contributo all'ampiezza di transizione solo se esce il 6.

Michael Goodman

Di solito in un calcolo di QCD a ciascuna delle 566 unità di elaborazione parallele del GF11 viene assegnata una porzione di reticolo su cui lavorare. Gli algoritmi per generare i campi elettrocromatici casuali e per determinare i moti dei quark sono programmi che fanno «percorrere» a ciascuna unità di elaborazione la porzione di reticolo assegnatale. A ogni vertice del reticolo ciascuna unità si ferma per «agitare» il campo elettrocromatico (che in QCD corrisponde a scuotere il dado) secondo una modalità che dipende dal campo in quel punto e nei punti vicini.

Con il GF11 abbiamo tentato di stabilire quale fosse l'accordo tra i valori da noi calcolati e le masse osservate nel mondo reale, che corrisponde alla situazione in cui la distanza tra i punti del reticolo è nulla e il volume del reticolo è infinito. Abbiamo calcolato le masse per diversi volumi e spaziature del reticolo.

Dapprima abbiamo considerato il limite quando il volume tende all'infinito. Abbiamo scelto una distanza di $1,5 \times 10^{-14}$ centimetri tra i vertici del reticolo, in quanto sapevamo che essa forniva risultati non troppo lontani dai valori limite delle masse per una spaziatura nulla. Con questa spaziatura abbiamo calcolato le masse su reticoli di dimensioni diverse. I risultati ottenuti per un reticolo con 16 unità per lato non si scostavano più del 5 per cento dal limite per il volume infinito, e per un reticolo con 24 unità lo scostamento era dell'1 per cento.

Nella seconda fase abbiamo affrontato il limite della distanza tra i punti del reticolo. Abbiamo calcolato le masse per un reticolo di 24 unità per lato con una spaziatura di $1,0 \times 10^{-14}$ centimetri e per un reticolo di 32 unità con una spaziatura di $0,75 \times 10^{-14}$ centimetri. Entrambi i reticoli hanno lo stesso volume del nostro reticolo iniziale di 16 unità. Questi calcoli ci hanno consentito di estrapolare le nostre previsioni a un reticolo con spaziatura nulla: in altre parole, di confrontare i valori calcolati con quelli osservati delle masse.

down e strange. I quark up e down sono i costituenti dei neutroni (un quark up e due down) e dei protoni (due up e un down). I quark strange sono componenti di vari adroni instabili. Calcolammo ciascuna massa adronica su reticoli di diversa grandezza. Per ogni scelta di volume del reticolo e distanza tra i punti, calibrammo alcuni parametri sulla base delle masse note di tre adroni e ricavammo otto previsioni di massa per ciascun tipo di reticolo. Per trovare i valori limite per un reticolo con volume infinito e distanza nulla tra i punti, effettuammo estrapolazioni dalle previsioni ottenute rendendo la distanza più piccola e il volume più grande. Questi risultati estrapolati costituiscono le previsioni della QCD per il mondo reale.

ADRONE	MASSA (MILIONI DI ELETTRONVOLT) CALCOLATA	OSSERVATA
KAONE (STATO ECCITATO)	898 ± 12	896
PROTONE	936 ± 80	941
PHI	1026 ± 25	1022
DELTA	1205 ± 94	1235
SIGMA (STATO ECCITATO)	1391 ± 62	1388
XI + SIGMA − PROTONE	1484 ± 57	1576
XI (STATO ECCITATO)	1582 ± 50	1537
OMEGA	1768 ± 69	1676
GLUEBALL PIÙ LEGGERA	1740 ± 70	1710

Lisa Burnett

Masse adroniche calcolate a confronto con i valori osservati. La combinazione delle masse di Xi, Sigma e protone ha facilitato i calcoli.

Per ciascuna massa la differenza tra il valore previsto e quello trovato per via sperimentale non superava il 6 per cento. Nell'insieme, l'entità degli scostamenti rientrava negli errori previsti dell'algoritmo Montecarlo da noi impiegato. Benché le soluzioni fossero state trovate nell'ambito dell'approssimazione di valenza, sembrava improbabile che questa approssimazione fornisse per coincidenza otto risultati corretti se la QCD in sé fosse stata erronea. Pertanto questi esiti confermano sia le previsioni della QCD sulle masse sia la correttezza dell'approssimazione di valenza.

Di recente Sexton, Vaccarino e io abbiamo studiato le proprietà della glueball più leggera (il cappio chiuso del campo elettrocromatico già menzionato). I calcoli precedenti, effettuati con calcolatori più lenti, presentavano imprecisioni significative, tanto che quando iniziammo la nostra ricerca nessuna glueball era stata ancora identificata con certezza. Facendo lavorare per due anni ininterrottamente 448 unità di elaborazione del GF11, abbiamo calcolato la massa della glueball più leggera e la velocità con la quale essa decade in particelle più stabili. I risultati ci hanno stupito, perché, stando a essi, negli ultimi dodici anni questa particella deve essersi manifestata in parecchi esperimenti diversi, ma nessuno l'ha mai riconosciuta perché non si possedeva ancora un profilo abbastanza dettagliato delle sue proprietà. Questo calcolo rappresenta perciò la prima «scoperta» di una particella subnucleare dovuta al calcolatore.

Nonostante questo nostro successo, non esiste ancora una conferma diretta della QCD senza approssimazioni. Per ottenerla dovremo aspettare un calcolatore centinaia di volte più veloce del GF11, oppure algoritmi centinaia di volte più efficienti di quelli odierni. Una macchina di questa potenza è oggi in progetto alla Columbia University, un'altra all'INFN di Frascati e un'altra in Giappone. Un problema più difficile del calcolo delle masse, che forse richiede algoritmi del tutto nuovi, sarebbe quello di sfruttare la QCD per spiegare i risultati di certi esperimenti di diffusione di particelle.

Oltre a permetterci di trovare la massa degli adroni e delle glueball, i nostri calcoli sono il sintomo di un radicale cambiamento di direzione in certi settori della fisica delle particelle elementari. Benché in altri campi della fisica i calcolatori e i metodi numerici fossero già impiegati da tempo, l'analisi teorica del comportamento delle particelle veniva ancora compiuta a mano. Il nostro lavoro sulla QCD fu reso necessario dal fallimento degli usuali metodi analitici; i calcoli poi divennero possibili quando i computer furono abbastanza potenti da eseguire gli algoritmi essenziali.

Una differenza qualitativa tra i metodi manuali e l'impostazione numerica riguarda il grado di certezza che può essere attribuito ai risultati. Nel lavoro teorico con carta e matita si può (in linea di principio) verificare se ogni passaggio sia coerente con il precedente e quindi si può accertare la correttezza del risultato finale.

Viceversa, sia per la fisica sperimentale sia per i calcoli su vasta scala, non accade quasi mai che la correttezza dei risultati possa essere verificata in questo senso matematico. Accade piuttosto che i risultati vengano considerati plausibili se dopo un certo numero di tentativi non si riesce a dimostrarne la falsità. Possiamo accettare il risultato sperimentale che tutte le pietre cadono verso il basso e non verso l'alto perché nessuno ha mai visto una pietra cadere verso l'alto. Resta tuttavia aperta la possibilità che un giorno qualcuno ne trovi una che cade verso l'alto: quindi l'affermazione che tutte le pietre cadono verso il basso non è dimostrata in senso matematico stretto.

Anche nel nostro lavoro abbiamo cercato, senza trovarla, una pietra che cadesse verso l'alto. È concepibile che, se avessimo calcolato la massa del protone per un reticolo con una spaziatura molto più piccola di quella da noi usata, avremmo potuto ottenere, per esempio, 2000 milioni di elettronvolt (cioè 2000 MeV, dove 1 MeV è pari a circa $1{,}78 \times 10^{-30}$ grammi), rispetto al valore estrapolato per il reticolo a spaziatura nulla, che è di 936 MeV. Quindi il limite da noi ottenuto per la massa del protone è confermato dalla successione numerica usata nella nostra estrapolazione, ma non è dimostrato rigorosamente.

I calcoli che abbiamo eseguito potrebbero essere definiti con l'espressione in apparenza contraddittoria «fisica teorica sperimentale». Per la complessità delle teorie fisiche, per il costo dei grandi progetti e per la crescita continua della potenza di calcolo, la fisica teorica sperimentale potrebbe diventare, per alcuni settori della fisica, il metodo più pratico per sondare la natura.

DONALD H. WEINGARTEN è ricercatore presso il Thomas J. Watson Research Center dell'IBM e membro della American Physical Society; oltre che di cromodinamica quantistica numerica, si occupa di teorie quantistiche della gravitazione e di vari tipi di architetture di calcolatori.

CHENG TA-PEI e LI LING-FONG, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984.

WEINGARTEN D., *Lattice Quantum Chromodynamics* in *Particles, Strings and Supernovae*, a cura di A. Jevicki e C.-I. Tan, World Scientific, Singapore, 1989.

ROTHE H. J., *Lattice Gauge Theories*, World Scientific, Singapore, 1992.

BUTLER F., CHEN H., SEXTON J., VACCARINO A. e WEINGARTEN D., *Hadron Mass Predictions of the Valence Approximation to Lattice QCD* in «Physical Review Letters», 70, n. 19, 10 maggio 1993.

CREUTZ M., *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge University Press, 1993.

MONTVAY I. e MUNSTER G., *Quantum Fields on a Lattice*, Cambridge University Press, 1994.

Telomerasi e cancro

Un enzima insolito, attivo su particolari segmenti dei cromosomi, è stato trovato di recente in molti tumori umani e viene considerato un nuovo bersaglio per la terapia contro il cancro

di Carol W. Greider ed Elizabeth H. Blackburn

Spesso, in natura, le cose sono diverse da quello che sembrano: un sasso sul fondo marino potrebbe rivelarsi un pesce velenoso; un bel fiore in un giardino potrebbe in realtà essere un insetto carnivoro in attesa di una preda. Anche certi componenti delle cellule, tra cui i cromosomi (i filamenti lineari di DNA che contengono i geni), possono avere un aspetto fuorviante. Un tempo si riteneva che il DNA alle estremità dei cromosomi fosse statico, ma nella maggior parte degli organismi studiati le terminazioni cromosomiche - i telomeri - sono in realtà assai mutevoli: si accorciano e si allungano continuamente.

Negli ultimi 15 anni le ricerche svolte su questo inatteso fenomeno hanno prodotto numerose sorprendenti scoperte: in particolare, hanno portato alla identificazione di un enzima fuori dal comune, la telomerasi, che agisce sui telomeri e viene considerato indispensabile per lo sviluppo di numerose forme di cancro nell'uomo. Quest'ultimo dato ha ovviamente fatto sperare che farmaci in grado di inibire l'enzima possano combattere una vasta schiera di tumori maligni. La ricerca fa anche intravvedere la possibilità che cambiamenti di lunghezza dei telomeri nel corso del tempo abbiano talvolta un ruolo nella senescenza delle cellule umane.

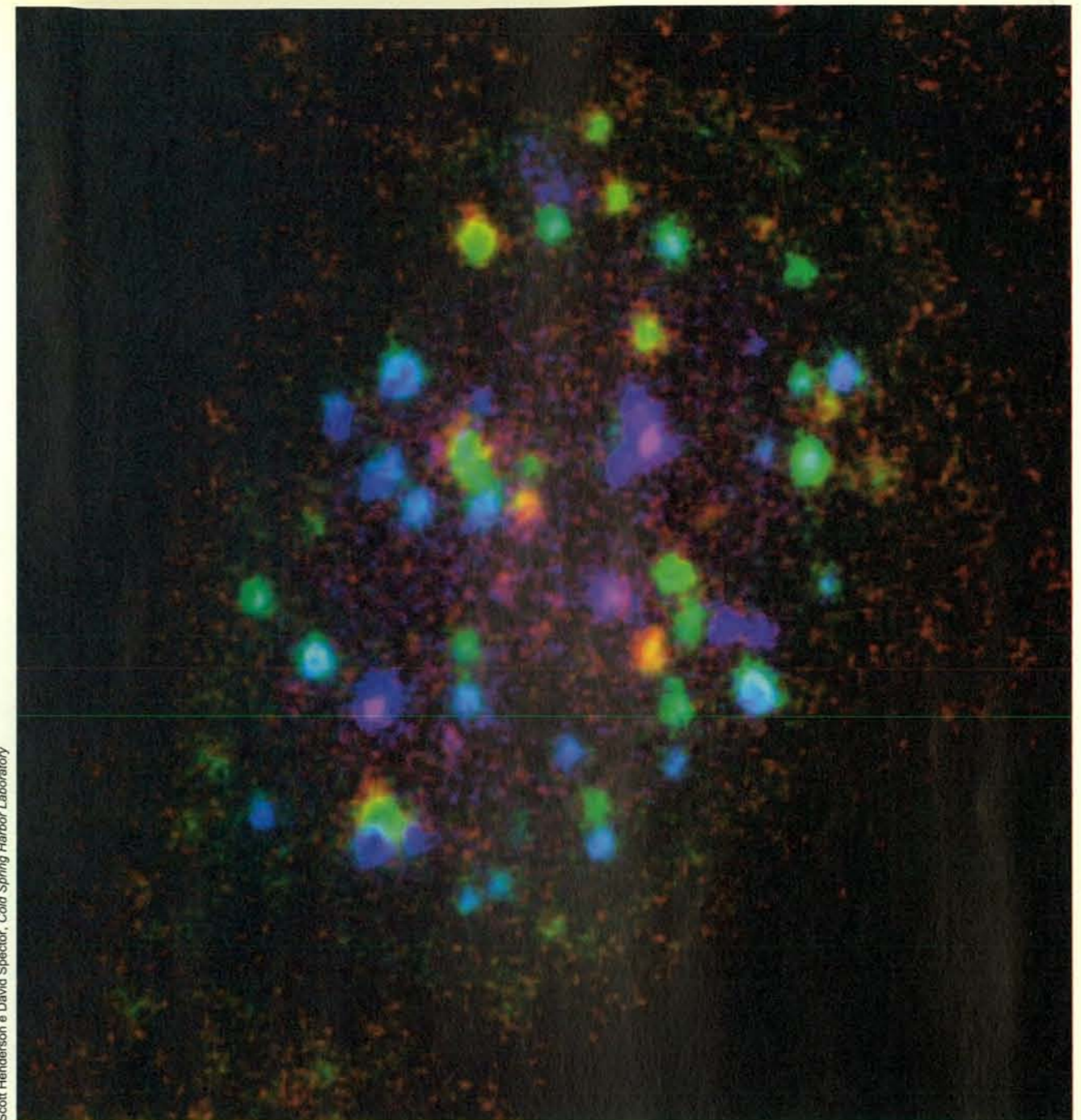
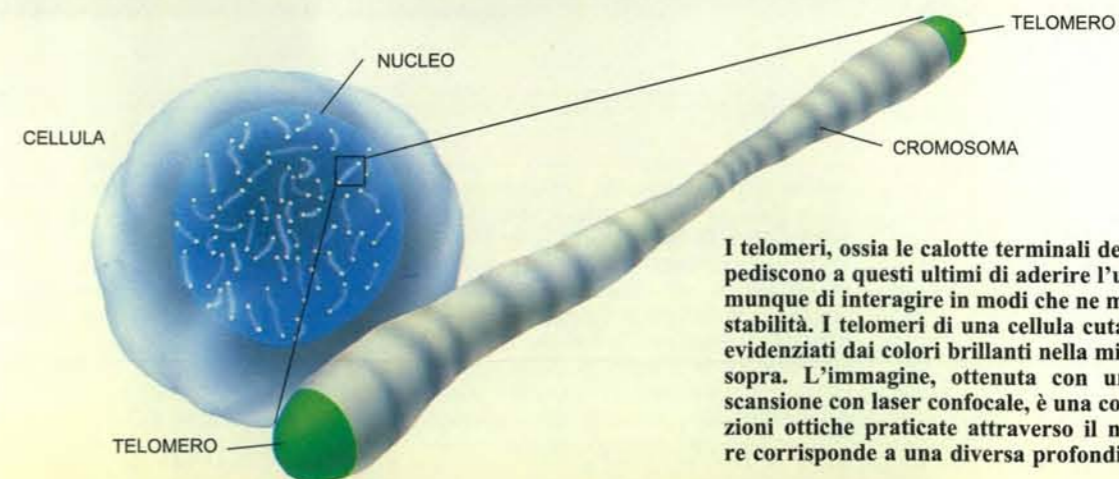
L'attuale interesse per i telomeri e la telomerasi non è una novità, ma può essere fatto risalire agli esperimenti condotti negli anni trenta da due importanti genetisti, Barbara McClintock e Hermann J. Muller, che lavoravano rispettivamente all'Università del Missouri a Columbia e all'Università di Edimburgo in Scozia. Studiando indipendentemente organismi diversi, entrambi si resero conto che i cromosomi sono dotati alle estremità di una componente speciale che conferisce loro stabilità. Muller coniò il termine telomero partendo da due parole greche: *telos* (fine) e *meros* (parte). La McClintock notò che, se non avessero queste calotte terminali, i cromosomi aderirebbero l'uno all'altro, subirebbero cambiamenti strutturali e si comporterebbero in maniera anomala, pregiudicando la duplicazione fedele dei cromosomi stessi e, di conseguenza, delle cellule che li contengono.

Tuttavia la precisa costituzione dei telomeri non venne determinata prima degli anni settanta. Nel 1978 una di noi (la Blackburn), che allora lavorava con Joseph G. Gall alla Yale University, trovò che nel ciliato *Tetrahymena*, un organismo unicellulare che vive negli stagni, i telomeri contenevano una sequenza nucleotidica semplice ed estremamente breve (*TTGGGG*), ripetuta innumerevoli volte. (I nucleotidi sono le unità costitutive del DNA; in generale sono indicati da una lettera che rappresenta la base azotata, diversa da un nucleotide all'altro. Nei nucleotidi *T* la base è la timina; nei nucleotidi *G* la base è la guanina.)

In seguito sono stati caratterizzati telomeri in numerosi animali, piante e microrganismi. Come nel caso di *Tetrahymena*, pressoché tutti i telomeri - compresi quelli del topo, dell'uomo e di altri vertebrati - contengono corte subunità ripetitive, spesso ricche di nucleotidi *T* e *G* (si veda l'articolo *Il telomero umano* di Robert K. Moyzis in «Le Scienze» n. 278, ottobre 1991). Per esempio, i telomeri dell'uomo e del topo presentano la sequenza *TTAGGG*, quelli del nematode *Ascaris* la sequenza *TTAGGC*. (*A* sta per adenina, *C* per citosina.)

La telomerasi, attualmente oggetto di tanta attenzione, venne scoperta quando il confronto fra le lunghezze dei telomeri fece pensare che un enzima di questo tipo potesse risolvere un annoso enigma della biologia. Agli inizi degli anni ottanta alcune ricerche avevano rivelato che, per qualche ragione, il numero di subunità ripetitive nei telomeri è diverso da organismo a organismo e perfino da cellula a cellula di uno stesso organismo; inoltre esso può fluttuare nel corso del tempo all'interno di una stessa cellula. (Ogni specie, però, ha un valore medio caratteristico. In *Tetrahymena* i telomeri hanno in media 70 unità ripetitive; nell'uomo questo valore sale a 2000.) Una simile eterogeneità indusse la Blackburn, che si era nel frattempo trasferita all'Università della California a Berkeley, Jack W. Szostak della Harvard University e Janis Shampay di Berkeley a proporre una nuova soluzione del cosiddetto problema della duplicazione terminale.

Ogni volta che le cellule si dividono, devono duplicare i propri geni in modo accurato, affinché ogni cellula figlia riceva un corredo genico completo; senza di esso, infatti, potrebbe funzionare male e morire. (I geni sono sequenze di nucleotidi responsabili della sintesi delle proteine e dell'RNA, molecole che svolgono la maggior parte delle funzioni cellulari. In un cromosoma essi sono distribuiti sulla lunga molecola di DNA, delimitata dai due telomeri.)

Nel 1972 James D. Watson, che lavorava sia a Harvard sia al Cold Spring Harbor Laboratory, notò che le DNA-polimerasi (enzimi che duplicano il DNA) non erano in grado di copiare i cromosomi lineari per tutta la loro lunghezza fino all'estremità. Pertanto il meccanismo di duplicazione lasciava un piccolo segmento non copiato sulla punta del cromosoma, cioè nella regione dei telomeri. In teoria, se le cellule non avessero modo di compensare questa anomalia, i cromosomi si accorcerebbero a ogni divisione cellulare. Questa continua erosione finirebbe per eliminare i telomeri e, con essi, geni d'importanza cruciale nell'arco di qualche generazione. Le cellule quindi perirebbero, decretando la fine del proprio ceppo. È chiaro, dunque, che tutte le specie unicellulari devono riuscire a evitare un simile accorciamento; in caso contrario, sarebbero scomparse da tempo. La stessa cosa fanno le cellule della linea ger-

Scott Henderson e David Spector, Cold Spring Harbor Laboratory

Tomo Narashima

I telomeri, ossia le calotte terminali dei cromosomi, impediscono a questi ultimi di aderire l'uno all'altro o comunque di interagire in modi che ne minaccerebbero la stabilità. I telomeri di una cellula cutanea umana sono evidenziati dai colori brillanti nella microfotografia qui sopra. L'immagine, ottenuta con un microscopio a scansione con laser confocale, è una composizione di sezioni ottiche praticate attraverso il nucleo; ogni colore corrisponde a una diversa profondità del preparato.

minale (come i precursori degli spermatozoi e delle cellule uovo), il cui compito consiste nel perpetuare la specie negli organismi pluricellulari. Ma come fanno queste cellule a proteggere i propri telomeri?

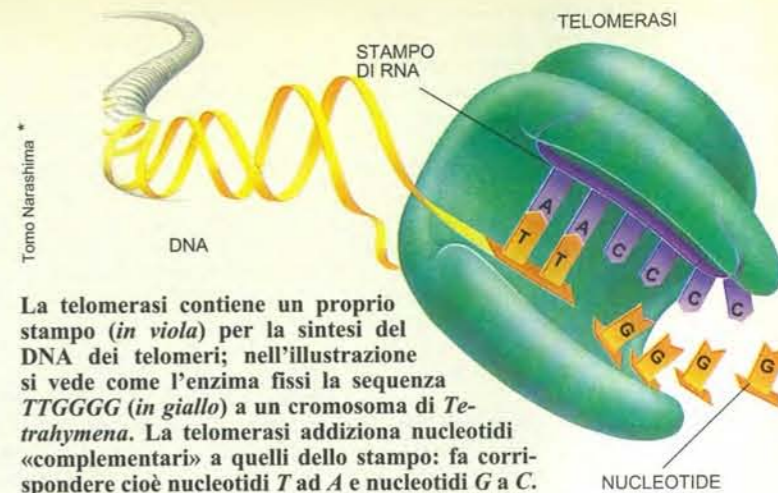
Secondo Blackburn, Szostak e Shampay, le fluttuazioni osservate nella lunghezza dei telomeri sarebbero rivelatrici del tentativo delle cellule di mantenere una dimensione grosso modo costante dei telomeri. In effetti questi ultimi si accorciano durante la divisione cellulare, ma si allungano anche per l'aggiunta di subunità telomeriche neosintetizzate. I tre ricercatori erano convinti che la fonte di queste unità ripetitive addizionali fosse un enzima non ancora scoperto, in grado di eseguire un «trucco» di cui le DNA-polimerasi standard non sono capaci.

Quando le cellule duplicano i propri cromosomi, consistenti in due filamenti di DNA avvolti l'uno attorno all'altro nella doppia elica, cominciano con il separare i filamenti. Ciascuno di questi è poi utilizzato dalle polimerasi come stampo per costruire un nuovo filamento corrispondente. L'enzima speciale ipotizzato dai tre ricercatori doveva essere capace di costruire prolungamenti dei singoli filamenti di DNA a partire da zero, senza il vantaggio di un preesistente stampo di DNA.

Nel 1984 noi due, lavorando a Berkeley nel laboratorio della Blackburn, ci siamo prefisse di scoprire se questo ipotetico enzima che allunga i telomeri - la telomerasi - esisteva veramente. Con nostra grande soddisfazione abbiamo scoperto che era proprio così. Mescolando telomeri sintetici con estratti di cellule di *Tetrahymena*, abbiamo visto che ai telomeri si fissavano subunità aggiuntive, proprio come avrebbe dovuto accadere se fosse stato presente l'enzima supposto.

Negli anni seguenti, assieme ai nostri collaboratori, abbiamo appreso molte cose sul funzionamento della telomerasi. Come tutte le polimerasi, e pressoché tutti gli enzimi, essa ha natura prevalentemente proteica; una particolarità davvero unica, tuttavia, è che essa contiene anche una singola molecola di RNA con lo stampo nucleotidico fondamentale per la sintesi delle subunità telomeriche. La telomerasi colloca l'estremità di un filamento di DNA sull'RNA, posizionandosi in modo che lo stampo sia adiacente a quella estremità. Quindi addiziona i nucleotidi di DNA uno alla volta fino a che si è formata un'intera subunità telomerica. Quando la subunità è completa, la telomerasi può costruirne un'altra, scivolando verso la nuova estremità del cromosoma e ripetendo il processo di sintesi.

Nel 1988 la Greider si trasferì da Berkeley al Cold Spring Harbor Laboratory; in seguito i nostri e altri gruppi di ricerca scoprirono la telomerasi in ciliati diversi da *Tetrahymena*, come pure in lieviti, rane e topi. Nel 1989 Gregg B. Morin della Yale University la individuò per la prima volta in un ceppo di cellule neoplastiche umane, cioè in cellule tumorali mantenute per generazioni in coltura. Oggi è evidente che la telomerasi viene sintetizzata da quasi tutti gli organismi con cellule nucleate. L'esatta costituzione dell'enzima può differire da specie a specie, ma ciascuna versione possiede uno stampo di RNA specie-specifico, che serve a sintetizzare le unità ripetitive telomeriche.

L'importanza della telomerasi in parecchi organismi unicellulari è oggi indiscutibile. Questi organismi sono immortali nel senso che, se si escludono incidenti o interventi dei genetisti, essi possono continuare a dividersi per un tempo illimitato. Come ha dimostrato nel 1990 Guo-Liang Yu del gruppo di ricerca della Blackburn, *Tetrahymena* ha bisogno della telomerasi per mantenere questa immortalità. Quando l'enzima è alterato, i telomeri si accorciano e la cellula muore. Il gruppo della Blackburn e altri hanno dimostrato che anche nei lieviti le cellule prive di telomerasi subiscono un accorciamento dei telomeri e muoiono. Ma quale ruolo svolge la telomerasi nell'organismo umano, che è costituito da una miriade di tipi cellulari ed è considerevolmente più complesso che non *Tetrahymena* o il lievito?

Sorprendentemente, molte cellule umane sono prive di telomerasi. La Greider e collaboratori fecero questa scoperta alla fine degli anni ottanta, mentre tiravano le fila di ricerche iniziate da studiosi di Filadelfia più di un quarto di secolo prima. Fino agli anni sessanta si pensava che le cellule umane che si duplicano nell'organismo fossero in grado di dividersi illimitatamente. Ma Leonard Hayflick e collaboratori del Wistar Institute dimostrarono inequivocabilmente che quest'idea era sbagliata. Oggi si sa che cellule somatiche (cioè quelle cellule che non fanno parte della linea germinale) prelevate da neonati umani si dividono in genere da 80 a 90 volte in coltura, mentre quelle di un individuo di 70 anni si dividono probabilmente solo 20-30 volte. Quando le cellule umane che sono normalmente in grado di dividersi cessano di riprodursi (o, per usare le parole di Hayflick, diventano «senescenti»), assumono un aspetto diverso e funzionano con minore efficienza rispetto a quando erano giovani; dopo un certo periodo muoiono.

Durante gli anni settanta uno scienziato sovietico, A. M. Olovnikov, associò questa cessazione programmata della divisione cellulare al problema della duplicazione terminale, proponendo che le cellule somatiche umane potrebbero non correggere l'accorciamento cromosomico che ha luogo durante la duplicazione del DNA. Forse la divisione cessa quando le cellule si accorgono che i loro cromosomi sono diventati troppo corti.

Siamo venuti a conoscenza delle idee di Olovnikov solo nel 1988, grazie a Calvin B. Harley, che allora lavorava alla McMaster University. Incuriosita, la Greider, assieme a Harley e collaboratori, decise di controllare se nelle cellule umane i cromosomi si accorciano realmente con il passare del tempo.

La maggior parte delle cellule somatiche esaminate dal gruppo di ricerca perdeva effettivamente segmenti di telomeri durante la divisione in coltura, un segno che la telomerasi non era attiva. Analogamente, assieme al gruppo di Nicholas D. Hastie del Medical Research Council (MRC) di Edimburgo, essi hanno trovato che in alcuni tessuti normali umani i telomeri si accorciano con il passare degli anni. (Cosa rassicurante, Howard J. Cooke, anch'egli dell'MRC di Edimburgo, aveva già dimostrato che i telomeri si mantengono intatti nella linea germinale.) Questi risultati hanno indicato che le cellule umane potrebbero «contare» le divisioni effettuate controllando quante unità ripetitive telomeriche hanno perduto, e potrebbero così cessare di dividersi quando i telomeri si riducono a una certa lunghezza critica. La prova definitiva di questa ipotesi non è stata però ancora ottenuta.

L'accorciamento dei telomeri e la riduzione della capacità proliferativa con il passare del tempo potrebbero essere una delle cause di invecchiamento nell'uomo? Probabilmente sì, però non la causa principale. In fin dei conti, le cellule possono di solito dividersi un numero di volte superiore a quanto richiesto nel corso di una vita umana. Ciononostante, l'attività dell'organismo in età avanzata può essere a volte compromessa dalla senescenza di un sottoinsieme di cellule. Per esempio, la cicatrizzazione di una ferita potrebbe essere ostacolata da una riduzione del numero di cellule disponibili per produrre nuo-

Il problema della duplicazione terminale

I meccanismi standard che permettono di duplicare i cromosomi durante la divisione cellulare non sono in grado di svolgere un lavoro completo. Quando le DNA-polimerasi copiano i due filamenti originali, o «parentali», di DNA del cromosoma, ogni nuovo filamento «figlio» risulta accorciato a un'estremità (quella tradizionalmente indicata con 5'). Se le cellule non compensassero questo difetto nel meccanismo di duplicazione, i cromosomi si accorcerebbero inesorabilmente. L'esistenza della telomerasi, l'enzima che allunga i telomeri, è stata proposta agli inizi degli anni ottanta come soluzione al problema della duplicazione terminale.

1 La copiatura del DNA cromosomico, qui illustrata in maniera molto schematica, parte da segmenti noti come origini della duplicazione, in corrispondenza dei quali i filamenti parentali si separano. La sintesi di ciascun filamento figlio avviene in maniera continua (*frecce nere*) su un lato del segmento e in maniera discontinua (*frecce rosse*) sul lato opposto.

2 I filamenti parentali separati fanno da stampi sui quali le polimerasi sintetizzano i filamenti figli. Le parti prodotte in maniera frammentaria si estendono a partire da segmenti di RNA chiamati *primer* o inneschi.

3 Altri enzimi rimuovono i *primer* e colmano le lacune tra frammenti adiacenti.

4 Questi enzimi non possono tuttavia colmare la lacuna che rimane a una estremità (5') di ogni filamento figlio.

Come la telomerasi risolve il problema

Un modello che illustra come la telomerasi risolva il problema della duplicazione terminale propone che, prima dell'inizio della duplicazione, l'enzima addizioni DNA ai cromosomi. Questo DNA aggiunto consiste in una o più subunità telomeriche, ossia brevi sequenze nucleotidiche che si ripetono più e più volte nei telomeri. Questo processo garantisce che un filamento figlio sia alla fine lungo almeno come il filamento parentale.

1 Prima che la duplicazione abbia inizio, la telomerasi addiziona alcune subunità ripetitive telomeriche (*in giallo*) all'estremità di ciascun filamento parentale.

2 I filamenti parentali si separano.

3 I filamenti figli vengono sintetizzati nel modo usuale.

4 Vengono rimossi i *primer* e riempite le lacune interne.

5 I filamenti figli alla fine non risultano più brevi dei filamenti parentali.

Tomo Narashima

La telomerasi contiene un proprio stampo (*in viola*) per la sintesi del DNA dei telomeri; nell'illustrazione si vede come l'enzima fissi la sequenza *TTGGGG* (*in giallo*) a un cromosoma di *Tetrahymena*. La telomerasi addiziona nucleotidi «complementari» a quelli dello stampo: fa corrispondere cioè nucleotidi *T* ad *A* e nucleotidi *G* a *C*.

va cute nel punto della lesione e una riduzione del numero di certi globuli bianchi nel sangue potrebbe contribuire al declino della risposta immunitaria correlato con l'età. Inoltre è noto che l'aterosclerosi si sviluppa tipicamente dove le pareti dei vasi sanguigni sono state danneggiate. È concepibile che le cellule in corrispondenza di zone ripetutamente lese finiscano con l'esaurire la loro capacità duplicativa; pertanto, a un certo momento, i vasi non riescono più a sostituire le cellule perdute. Il danno diventa così permanente e l'aterosclerosi finisce per manifestarsi.

Alcuni ricercatori ritengono che la perdita di capacità proliferativa osservata nelle cellule umane prive di telomerasi possa essersi evoluta non per renderci decrepiti, ma per aiutarci a evitare il cancro. Una neoplasia insorge quando una cellula subisce molteplici mutazioni genetiche, le quali nell'insieme la sottraggono ai normali controlli che si esercitano sulla duplicazione e sulla migrazione cellulare. Via via che la cellula e la sua discendenza si moltiplicano in modo incontrollabile, possono invadere e danneggiare i tessuti circostanti. Alcune cellule possono addirittura staccarsi e portarsi in parti dell'organismo che non sono loro proprie, stabilendo nuove neoplasie (metastasi) in queste sedi lontane. In teoria, la mancanza di telomerasi dovrebbe ritardare lo sviluppo dei tumori, facendo perdere telomeri alle cellule che si riproducono ininterrottamente e provocandone così la morte prima che possano causare danni notevoli. Se le cellule tumorali producessero telomerasi, conserverebbero i propri telomeri e potrebbero teoricamente vivere all'infinito.

L'idea che la telomerasi possa essere importante per la persistenza delle varie forme di cancro nell'uomo è stata oggetto di discussione fin dal 1990, ma solo da poco sono emerse prove convincenti. Nel 1994 Christopher M. Counter, Silvia Bacchetti, Harley e collaboratori della McMaster University hanno dimostrato che la telomerasi è attiva non soltanto nelle linee cellulari neoplastiche coltivate in laboratorio, ma anche in tumori ovarici dell'organismo umano. Successivamente, in quello stesso anno, gruppi di ricerca diretti da Harley, che si era trasferito alla Geron Corporation di Menlo Park, in California, e da Jerry W. Shay del Southwestern Medical Center dell'Università del Texas a Dallas hanno individuato l'enzima telomerasi in 90 su 101 campioni di tumori umani (rappresentanti 12 tipi di tumori) e in nessuno dei 50 campioni di tessuto normale presi come controllo.

Ancora prima che fosse possibile ottenere questa prova, però, si era già cominciato a studiare in maniera approfondita il ruolo svolto dalla telomerasi nell'instaurarsi del cancro. Tale ricerca si proponeva di dimostrare che l'enzima probabilmente diventa attivo quando una cellula non è più soggetta a controlli sulla proliferazione.

Il primo indizio è stata una scoperta dapprima incomprensibile, fatta indipendentemente da Titia de Lange, oggi alla Rockefeller University, e dal gruppo di Hastie. Nel 1990, questi ricercatori hanno riferito che i telomeri nei tumori umani sono più corti di quelli nel tessuto normale circostante, talvolta anche in modo molto evidente.

Studi compiuti nei laboratori della Greider, della Bacchetti e di Harley hanno permesso di spiegare questa peculiarità. I vari gruppi avevano indotto cellule umane normali a produrre una proteina virale in grado di far loro ignorare i segnali di allarme che normalmente le avvisano di cessare la divisione. Le cellule così trattate continuavano a proliferare a lungo dopo il momento in cui, di norma, avrebbero dovuto entrare nella fase di senescenza. Nella maggior parte di esse i telomeri si accorciavano in modo drastico e la telomerasi appariva assente; alla fine, le cellule morivano. Alcune, però, persistevano anche dopo la morte delle altre cellule e diventavano immortali. In queste cellule sopravvissute i telomeri si conservavano con una lunghezza sorprendentemente ridotta ed era presente la telomerasi.

Questi risultati sembrano dimostrare che nelle cellule neoplastiche i telomeri sono corti perché la telomerasi comincia a essere sintetizzata solo dopo che le cellule hanno cominciato a riprodursi in modo incontrollabile; a questo punto esse hanno presumibilmente già perduto un numero cospicuo di subunità telomeriche. Quando finalmente l'enzima si attiva, la sua funzione è quella di stabilizzare i telomeri accorciati, consentendo alle cellule proliferanti di diventare immortali.

Questi e altri dati hanno permesso di costruire un modello, interessante anche se ipotetico, dell'attivazione normale e maligna della telomerasi da parte dell'organismo umano. In base a esso, la telomerasi viene prodotta normalmente dalle cellule della linea germinale nell'embrione in via di sviluppo. Tuttavia, una volta che l'organismo si è completamente formato, la telomerasi viene soppressa in molte cellule somatiche e i telomeri si accorciano allorché queste cellule si riproducono. Quando la lunghezza dei telomeri raggiunge un valore soglia, viene emesso un segnale che impedisce alle cellule di dividersi ulteriormente.

Se invece le mutazioni genetiche che promuovono il cancro bloccano l'emissione di questi segnali o consentono alle cellule di ignorarli, queste ultime non entrano nella normale fase di senescenza e continuano a dividersi. Presumibilmente continuano anche a perdere sequenze telomeriche e a subire alterazioni cromosomiche tali da permettere l'instaurarsi di ulteriori mutazioni che possono essere cancerogene. Quando i telomeri sono completamente, o quasi completamente, perduti, le cellule possono arrivare a deteriorarsi totalmente e infine a morire.

Tuttavia, se le alterazioni genetiche precedenti a questa crisi finale portano alla produzione di telomerasi, le cellule non perdono del tutto i telomeri. Al contrario, i telomeri ridimensionati in lunghezza possono essere salvati e conservati, facendo acquisire alle cellule l'immortalità caratteristica delle cellule tumorali.

Questo scenario è stato in gran parte confermato sperimentalmente, anche se, ancora una volta, le cose possono essere un po' diverse da come sembrano. Alcuni tumori in fase avanzata sono privi di telomerasi, ed è stato scoperto di recente che certe cellule somatiche - in particolare i macrofagi e i linfociti - producono l'enzima. Ciononondimeno, i dati nel loro complesso indicano che molte cellule tumorali hanno bisogno della telomerasi per potersi dividere a tempo indefinito.

La presenza di telomerasi in vari tumori umani e la sua assenza in molte cellule normali implicano che questo enzima potrebbe essere un buon bersaglio per i farmaci antitumorali. Agenti in grado di ostacolare la telomerasi potrebbero uccidere le cellule tumorali (consentendo ai telomeri di accorciarsi e infine scomparire), senza alterare il funzionamento di molte cellule normali. Invece le terapie antitumorali oggi esistenti per lo più attaccano le cellule normali insieme con quelle neoplastiche e quindi sono spesso tossiche. Inoltre, poiché la telomerasi è presente in numerosi tipi di cancro, simili agenti potrebbero funzionare contro una vasta schiera di tumori.

Queste possibilità entusiasmanti vengono oggi attivamente indagate dall'industria farmaceutica e biotecnologica. Numerosi interrogativi devono però ancora ricevere una risposta. Per esempio, occorre determinare quali cellule normali (oltre alle poche già identificate) producono la telomerasi e stabilire l'importanza che ha per loro questo enzima. Se la telomerasi è fondamentale, i farmaci che interferiscono con essa potrebbero risultare eccessivamente tossici. L'estremo accorciamento dei telomeri in certe cellule tumorali può, tuttavia, ovviare a questo problema. Gli agenti che inibiscono la telomerasi potrebbero far sì che le cellule tumorali muoiano per eliminazione dei telomeri ben prima che le cellule normali subiscano effetti nocivi perdendo una parte abbastanza cospicua dei loro telomeri, sempre più lunghi di quelli delle cellule tumorali.

È pure da dimostrare se l'inibizione della telomerasi possa realmente portare alla distruzione dei tumori che producono questo enzima. Nel settembre 1995, Harley, la Greider e collaboratori hanno osservato che un agente inibitore poteva far accorciare i telomeri di cellule tumorali in coltura; le cellule interessate morivano dopo circa 25 cicli di divisione cellulare. Tuttavia la Blackburn, che oggi lavora all'Università della California a San Francisco, ha trovato, assieme al suo gruppo, che le cellule possono a volte compensare la perdita della telomerasi. Esse riparano le estremità accorciate con altri mezzi, per esempio con un processo di ricombinazione in cui un cromosoma riceve DNA da un altro cromosoma. Se l'attivazione di vie alternative per il «salvataggio» dei telomeri avvenisse frequentemente nei tumori umani, la terapia mirata sulla telomerasi fallirebbe.

Studi sugli animali dovrebbero aiutare a risolvere questi problemi e dovrebbero anche rivelare se gli inibitori della telomerasi sono in grado di eliminare i tumori nell'organismo vivente agendo con sufficiente rapidità da impedire al tumore di ledere tessuti di vitale importanza.

Per poter mettere a punto farmaci in grado di bloccare la telomerasi nell'organismo umano, occorrerà anche avere un'idea più chiara di come funziona esattamente l'enzima. Come si fissa al DNA? Come «decide» quante subunità telomeriche vanno aggiunte? Il DNA del nucleo è costellato di proteine di ogni tipo, incluse alcune che si legano specificamente al telomero. Quale ruolo svolgono queste proteine nel controllo dell'attività della telomerasi? L'alterazione delle loro funzioni potrebbe pregiudicare l'allungamento dei telomeri? Prevediamo che, entro i prossimi 10 anni, riusciremo a chiarire molti aspetti delle interazioni tra le molecole che influenzano la lunghezza dei telomeri.

La ricerca sulla regolazione della lunghezza dei telomeri potrebbe dimostrarsi utile anche al di là delle nuove terapie antitumorali. Un procedimento diffuso nella terapia genica per svariate malattie comporta l'estrazione di cellule da un paziente, l'inserimento in esse del gene desiderato e quindi il reinserimento nello stesso paziente delle cellule geneticamente corrette. Spesso però le cellule che sono state prelevate proliferano con difficoltà in laboratorio. Forse l'inserimento della telomerasi, da sola o in combinazione con altri fattori, potrebbe potenziarne temporaneamente la capacità di duplicazione, rendendo disponibili maggiori quantità di cellule da somministrare al paziente per la terapia.

La ricerca moderna sui telomeri ha fatto parecchia strada dall'identificazione iniziale di segmenti ripetitivi di DNA alle estremità dei cromosomi di un organismo unicellulare. L'allungamento dei telomeri da parte della telomerasi, considerato all'inizio semplicemente un meccanismo «ingegnoso» che permette ad alcuni organismi unicellulari di conservare integri i propri cromosomi, ha dimostrato più che mai di essere qualcosa di ben diverso da ciò che sembrava.

La telomerasi è, in effetti, il mezzo principale con il quale le cellule nucleate della maggior parte degli animali proteggono i propri segmenti cromosomici terminali; e oggi lo studio di questo processo un tempo oscuro potrà condurre a strategie innovative per la lotta contro un'ampia schiera di tumori.

Agli inizi degli anni ottanta gli scienziati non avrebbero mai immaginato di individuare potenziali terapie antitumorali indagando sulla conservazione dei cromosomi in organismi come *Tetrahymena*. La ricerca sulla telomerasi ci ricorda che, nello studio della natura, non si può mai prevedere dove e quando saranno svelati processi fondamentali: pensando di avere fra le mani un sasso ci si può accorgere di avere invece trovato una gemma.

Judith Campisi, Lawrence Berkeley Laboratory

CELLULE GIOVANI

CELLULE SENESCENTI

CELLULE TUMORALI

Secondo il modello della regolazione della lunghezza dei telomeri nell'organismo umano, le cellule della linea germinale producono telomerasi con cui mantengono costante la lunghezza dei telomeri. Per contro, molte cellule somatiche sono presumibilmente prive di telomerasi, e quindi con il passare del tempo i loro telomeri si accorciano. Alla fine la maggior parte delle cellule somatiche diventa senescente, ossia cessa di dividersi e subisce altri cambiamenti. Tuttavia vi sono cellule aberranti che possono continuare a dividersi. Molte perdono unità ripetitive dai telomeri fino a che raggiungono un punto di crisi e muoiono; se però acquisiscono la capacità di produrre telomerasi, queste cellule alterate potranno duplicarsi illimitatamente. Una simile proprietà, che si riscontra in numerose cellule tumorali, è chiamata immortalità cellulare.

CAROL W. GREIDER ed ELIZABETH H. BLACKBURN hanno cominciato a collaborare quando la Greider si è trasferita nel laboratorio della Blackburn presso l'Università della California a Berkeley. La Greider, che si è laureata in biologia molecolare a Berkeley, è ricercatrice al Cold Spring Harbor Laboratory; la Blackburn ha insegnato microbiologia e immunologia all'Università della California a San Francisco prima di ottenere la cattedra a Berkeley.

GREIDER CAROL W. e BLACKBURN ELIZABETH H., *Identification of a Specific Telomere Terminal Transferase Activity in* Tetrahymena *Extracts* in «Cell», 43, parte 1, dicembre 1985.

YU G.-L., BRADLEY J. D., ATTARDI L. D. e BLACKBURN E. H., *In vivo Alteration of Telomere Sequences and Senescence Caused by Mutated* Tetrahymena *Telomerase RNAs* in «Nature», 344, 8 marzo 1990.

HARLEY C. B., KIM N. W., PROWSE K. R., WEINRICH S. L., HIRSCH K. S., WEST M. D., BACCHETTI S., HIRTE H. W., GREIDER C. W., WRIGHT W. E. e SHAY J. W., *Telomerase, Cell Immortality and Cancer* in «Cold Spring Harbor Symposia in Quantitative Biology», LXIX, 1994.

BLACKBURN E. H. e GREIDER C. W. (a cura), *Telomeres*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1995.

Il rondone pallido: un genitore perfetto

Ogni giorno i rondoni nidificanti devono decidere se nutrire se stessi per sopravvivere o alimentare i figli che rappresentano il proprio contributo genetico alla generazione successiva

di Giorgio Malacarne e Marco Cucco

Il più completo studio sulla vita domestica del rondone risale a oltre quarant'anni fa quando, dall'interno del Museo di storia naturale di Oxford, i coniugi David ed Elisabeth Lack cominciarono a osservare le schermaglie, i corteggiamenti e le altre fasi della riproduzione di questo uccello che nidifica in quasi tutte le città d'Europa. Per «Scientific American» (e precisamente per l'ormai introvabile fascicolo del luglio 1954) essi ricostruirono un quadro completo del comportamento di questo volatore superspecializzato, che non si posa mai a terra se non quando si infila a grande velocità nei fori dei palazzi dove costruisce un nido di pagliuzze e piume cementate con la saliva.

Nell'articolo veniva descritta anche la crescita dei piccoli, che in quaranta giorni circa, a seconda dell'abbondanza di cibo, si involano per non tornare mai più al nido di nascita, e veniva evidenziato come, appena terminata la riproduzione, giovani e adulti rientrino immediatamente nei quartieri di svernamento africani, dimostrando di essere i migratori che rimangono per meno tempo in Europa. Essi, infatti, in soli tre mesi, da maggio a luglio, raggiungono le aree di nidificazione, si riproducono e iniziano il lungo viaggio di ritorno verso sud.

David Lack non studiò solo i rondoni ma anche i fringuelli di Darwin, i pettirossi e tantissimi altri uccelli delle campagne inglesi. La sua opera è divenuta col tempo un caposaldo dell'ecologia evoluzionistica, quella branca della biologia che studia come l'ambiente plasmi il comportamento delle popolazioni animali. Egli formulò alcune teorie fondamentali per capire la diversità dei cicli vitali e riproduttivi degli animali (*life-history*) e in particolare degli uccelli. Se ci soffermiamo solo su questa classe di vertebrati ci accorgiamo che esiste una grande varietà nelle modalità riproduttive: accanto a specie poco feconde (un solo uovo all'anno), longeve e che raggiungono la maturità sessuale in età avanzata, ve ne sono altre che depongono molte uova, sono soggette a intensa mortalità e raggiungono la maturità sessuale già al primo anno di vita. Al primo gruppo appartengono uccelli quali l'albatros, la berta, il cigno e l'aquila, al secondo piccoli passeriformi come la cinciarella o il pettirosso.

Lack ritiene che le ragioni di questa diversità si possano comprendere solamente considerando come ciascun carattere anatomico, fisiologico o comportamentale contribuisca alla sopravvivenza di ciascun individuo. In una popolazione verranno selezionati gli animali che riescono a sopravvivere e a riprodursi più di altri, trasmettendo alle future generazioni le caratteristiche più idonee a vivere in quel determinato ambiente.

Gli studi di Lack costituiscono la base di una teoria, detta della selezione individuale, che si contrappone a quella prevalente negli anni 1950-1970, secondo la quale gli adattamenti riproduttivi degli animali si sarebbero originati per il vantaggio dell'intera popolazione (selezione di gruppo). Secondo questa seconda teoria, il risultato della selezione di gruppo è una popolazione ottimale di organismi che sono in grado di sfruttare solo fino a una certa soglia le risorse di cui necessitano. Il numero di discendenti che una femmina produce sarebbe dunque il risultato di un'inconscia «convenzione altruistica» tra tutte le femmine della specie le quali, mettendo al mondo un numero limitato di figli, garantirebbero nutrimento per tutti; solo in questo modo la specie potrebbe mantenere un equilibrio con le risorse presenti nell'ambiente, senza esaurirle.

Oggi, non essendo stata dimostrata l'esistenza di alcun comportamento puramente altruista - vale a dire vantaggioso per la popolazione, ma di detrimento per l'individuo che lo compie - l'ipotesi della selezione individuale ha preso il sopravvento e si è affermata come la migliore cornice teorica per spiegare la molteplicità di funzioni degli animali (e delle piante).

Storicamente gli studi e le argomentazioni di Lack hanno avuto un ruolo fondamentale nel far prevalere questa convinzione negli scienziati. Il numero di uova che una femmina depone è

Foto Giovanni Boano

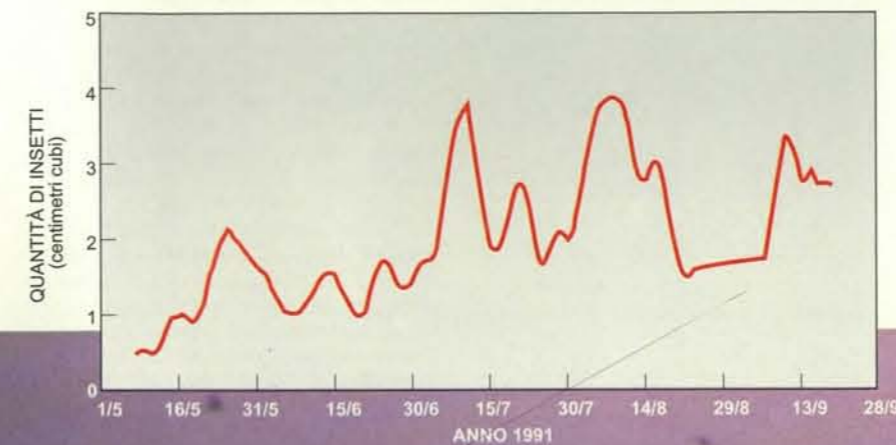
Un rondone pallido (*Apus pallidus*) si posa sul nido in una casa di Carmagnola. Il Piemonte è il limite settentrionale dell'areale riproduttivo di questa specie mediterranea.

La quantità di insetti presenti nell'atmosfera è molto variabile da un giorno all'altro, come esemplificato dalle catture effettuate a Carmagnola nel 1991 tramite una torre aspirante alta 12 metri. Si può anche notare che - diversamente da quanto osservato nei paesi nordici, dove vive il rondone (*Apus apus*) - nell'Italia settentrionale non ci sono mai giorni così freddi o piovosi da provocare una totale assenza di insetti.

Foto Giovanni Boano

Specie	Longevità massima (anni)	Mortalità annuale (per cento)	Età della maturità sessuale (anni)	Dimensione della covata (uova)	Peso (grammi)
Cinciarella	10	70	1	12-14	11
Pettirosso	13	52	1	4-6	18
Passero	12	50	1	3-6	30
Storno	20	50	1-2	4-6	80
Merlo	20	42	1	3-5	100
Rondine	16	63	1	4-6	20
Rondone	21	15	2	2-3	42
Allocco	18	26	2	2-4	700
Pulcinella di mare	22	5	4	1	400
Gabbiano tridattilo	21	14	4-5	2-3	400
Gabbiano reale	36	6	3-5	3	1000
Pavoncella	23	32	1-2	4	250
Avocetta	25	22	2-3	4	320
Gheppio	17	34	1-2	4-6	220
Poiana	26	19	2-3	2-4	800
Edredone	18	20	2-3	4-6	220
Oca facciabianca	23	9	3	3-5	1500
Cigno reale	22	10	3-4	5-8	11 000
Airone cenerino	25	30	2	4-5	800
Cicogna bianca	26	21	3-5	3-5	200
Cormorano	21	16	3-4	3-4	2000
Berta	31	5	5-8	1	530
Albatros	36	3	8-10	1	8300

diventato l'esempio più utilizzato per spiegare il concetto di selezione che agisce a livello individuale. Si prevede che in ogni specie la selezione naturale premi le femmine che depongono quel numero di uova che produce il maggior numero di giovani in grado di prendere il volo. Chi depone meno uova sarà sfavorito perché produrrà un minor numero di figli, ma anche chi ne depone troppe sarà sfavorito perché non riuscirà ad allevare tutti i nidiacei. Così, se gli albatros depongono un solo uovo per stagione, non lo fanno per limitare e regolare il numero di uccelli che volano sui mari, ma per la difficoltà che i genitori avrebbero nell'allevare una nidiata più numerosa, vista l'impossibilità di reperire adeguate quantità di pesce per i voraci nidiacei.

La teoria sul vantaggio individuale della dimensione della covata è stata sottoposta a verifica sperimentale ingrandendo le nidiate in diverse specie, per accertare se gli uccelli fossero in grado di allevare ugualmente i nidiacei fino all'involo. Secondo la previsione di Lack, i genitori non dovrebbero riuscire a crescere tutti i piccoli presenti in nidiate più ampie di quella naturale, e questo è esattamente quanto è stato osservato in molte specie. Alcuni esperimenti dimostrano però che in diverse specie i genitori potrebbero allevare più piccoli di quanti ne producano naturalmente ogni anno; queste osservazioni, che sembrano contraddire l'ipotesi di Lack, non sono tali da farla scartare, ma offrono piuttosto lo spunto per migliorarla.

È stato principalmente George Williams, ora professore emerito di ecologia ed evoluzione alla State University of New York, a introdurre nella cornice concettuale preesistente un nuovo fattore: il costo della riproduzione. Con questo termine si intende il prezzo che un individuo che si riproduce più volte paga nell'investire il massimo di risorse in un solo evento riproduttivo. Per un genitore, mobilitare tutte le proprie risorse per la nidiata che sta allevando può essere controproducente in quanto aumenta i rischi di mortalità e può diminuire la futura efficienza riproduttiva. Il successo riproduttivo va quindi misurato lungo l'intero arco della vita e dipende anche dalla capacità dell'individuo di distribuire opportunamente nei singoli eventi riproduttivi le proprie potenzialità.

Lo studio sul campo di popolazioni naturali ha consentito di misurare il costo della riproduzione in alcune specie come la balia dal collare, un piccolo passeriforme studiato nell'isola svedese di Gotland da Carl Gustaffson dell'Università di Lund. Egli ha osservato che, se si aumenta sperimentalmente la dimensione della nidiata, nelle stagioni successive le femmine producono meno uova rispetto a quelle la cui nidiata non è stata manipolata. A sua volta la mortalità cresce quando nelle prime nidiate le balie hanno investito più della norma nella riproduzione. Anche Nadav Nur, dell'Università di Oxford, ha trovato che la mortalità delle femmine di cinciarella aumenta con l'ampliarsi della nidiata.

Le tecniche per «spiare» i rondoni

Il costo fisiologico della riproduzione (misurabile come diminuzione di peso dell'animale sottoposto a un notevole sforzo di allevamento della prole) è facilmente valutabile nei rondoni. Questi uccelli volano ininterrottamente e il volo è l'attività più dispendiosa dal punto di vista energetico, in quanto può superare di cinque-sei volte il dispendio della normale attività svolta a terra; così, in poche ore, gli adulti di rondone possono variare di peso in maniera considerevole. Si può stimare che in un'ora di volo vengano consumati circa 6,6 chilojoule, equivalenti a circa 0,175 grammi di grasso corporeo o al doppio di tessuto muscolare. In una giornata estiva con 16 ore di luce il rondone metabolizzerà circa 2,8 grammi di grasso. Per fare un paragone con l'uomo, se un individuo di 70 chilogrammi fosse in grado di volare con un consumo energetico simile, in un giorno potrebbe dimagrire di quasi dieci chilogrammi.

L'elevato consumo di energia deve venire compensato dalle calorie assunte con l'alimentazione. Questa dipende dall'ecologia della specie: i rondoni, così come le rondini e i gruccioni, cacciano gli insetti presenti nell'aria; gli sciami di imenotteri (formiche alate), omotteri (afidi), ditteri (mosche) e insetti volatori hanno una distribuzione abbastanza capricciosa e imprevedibile nel tempo e nello spazio a causa di fattori atmosferici quali il vento, l'insolazione, la temperatura e le piogge. In caso di condizioni meteorologiche avverse, i genitori sono costretti a dover scegliere tra alimentare i figli, a scapito delle proprie riserve di grasso, e trascurare la prole per garantirsi l'autosufficienza alimentare.

Proprio questo problema, il reperimento delle risorse alimentari durante l'allevamento della prole, è stato il tema della ricerca su due specie affini, il rondone (*Apus apus*) e il rondone pallido (*Apus pallidus*). Thais Martins e Jonathan Wright hanno studiato il rondone nella colonia di Oxford già utilizzata dai coniugi Lack, mentre noi abbiamo seguito, nella colonia situata in un antico edificio di Carmagnola, presso Torino, la «vita domestica» del rondone pallido, una specie la cui area di riproduzione è limitata all'Europa meridionale. Come il rondone, anche il rondone pallido sceglie per la nidificazione le feritoie o i fori presenti sulle pareti esterne delle case, anche se in molti casi sono ancora preferite le falesie a picco sul Mediterraneo, dove è presente la terza specie europea, il rondone maggiore o alpino (*Apus melba*).

In un vecchio edificio di Carmagnola, le cavità ospitanti il nido dei rondoni pallidi sono state modificate per consentire le osservazioni. Il sistema realizzato comprende telecamere munite di videoregistratore per controllare le attività e bilance elettroniche di precisione collegate a computer per misurare in continuazione il peso di genitori e figli e la quantità di insetti portati ai piccoli durante le imbeccate.

Volendo studiare il comportamento del rondone pallido durante la riproduzione, abbiamo costruito e nascosto presso la colonia un sistema di controllo (si potrebbe forse dire spionaggio) simile a quelli utilizzati da alcuni investigatori privati. Approfittando dell'assenza degli animali, durante il periodo invernale, le cavità contenenti i nidi sono state aperte verso l'interno dell'edificio e la loro parete è stata sostituita da un pannello contenente un microfono e l'obiettivo di una telecamera. Per registrare le variazioni di peso delle coppie e dei piccoli, sotto ciascun nido è stata introdotta una bilancia elettronica precisa al decimo di grammo; collegati alle bilance vi erano alcuni calcolatori che registravano in continuazione i cambiamenti di peso dell'insieme costituito da nido, uova o piccoli e genitori. Questo apparato ci ha consentito di osservare arrivi, permanenze, attività e uscite dei rondoni nonché di calcolare la frequenza delle visite al nido, il peso dei genitori e dei nidiacei durante la crescita, e infine il peso dei boli di insetti che i genitori portano ai figli.

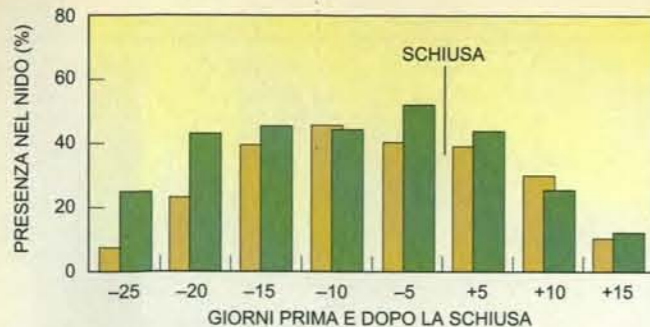
A questo punto ci mancava ancora un metodo per poter stimare giornalmente la disponibilità di cibo, rappresentato esclusivamente da insetti volatori (plancton aereo) presenti nell'area circostante la colonia. Siamo così ricorsi a un dispositivo messoci a disposizione dal Centro di fitovirologia del CNR di Torino che, nei pressi di Carmagnola, aveva collocato una torre aspirante alta 12,2 metri, normalmente utilizzata dagli agronomi per catturare gli insetti della zona e in particolare campionare gli afidi, vettori di microrganismi patogeni per

L'attività di cova delle uova o di assistenza ai piccoli appena nati è equamente divisa tra femmine e maschi, con la sola eccezione dei primi 10 giorni, quando le femmine mostrano un impegno superiore. Nei rondoni non c'è dimorfismo sessuale, per cui i ricercatori devono contrassegnare con una chiazza di colore sul dorso un membro della coppia ai fini del riconoscimento.

Foto Giovanni Boano

piante di interesse alimentare. Durante tutta la giornata la torre aspira gli insetti che passano nelle vicinanze della sua sommità e li convoglia verso un contenitore, dal quale possono poi essere estratti per contarli o, più velocemente, misurarne il volume totale tramite immersione in un cilindro graduato.

La collaborazione tra i genitori

Dato che la riproduzione richiede intense cure parentali, ci interessava conoscere come la coppia si suddividesse i compiti. Nei rondoni non c'è dimorfismo sessuale: esteriormente maschio e femmina sono assolutamente uguali. Il solo modo per distinguerli consiste nel marcare fin dall'inizio della stagione riproduttiva i due componenti della coppia (una piccola macchia bianca sul dorso è sufficiente), e attraverso le riprese della telecamera scoprire quale dei due depone le uova.

Una volta in grado di riconoscere individualmente i genitori, abbiamo constatato che in un buon numero di coppie l'impegno per la prole è sostanzialmente equilibrato: benché per la madre risultino un po' più gravosi i primi dieci giorni di incubazione delle uova, il contributo dei maschi è del tutto simile durante i restanti 50-60 giorni necessari per la schiusa delle uova e la crescita dei nidiacei. Ovviamente ci sono differenze tra le coppie, ma vale una certa legge di compensazione, e se un partner è poco attivo l'altro aumenta la propria attività per assicurare l'involo dell'intera nidiata.

Allevare i piccoli richiede dunque un grande impegno da parte di entrambi i genitori, che devono necessariamente restare uniti per tutto il periodo della riproduzione. In effetti gli etologi hanno osservato che, generalmente, quando un solo genitore è in grado di nutrire la prole, il sistema nuziale è poligamico, poiché l'altro partner cerca di aumentare il proprio successo riproduttivo accoppiandosi con altri individui, mentre, quando occorre lo sforzo congiunto dei due genitori per riuscire ad allevare i figli, il sistema riproduttivo è di tipo monogamico. Per le specie più longeve, tra le quali sono diventate famose le oche tra gli uccelli e le volpi e i gibboni tra i mammiferi, il legame tra i membri della coppia può mantenersi per molti anni sino alla morte di uno dei due (monogamia pluristagionale). I rondoni pallidi, uccelli piuttosto longevi, sembrano quindi dei buoni candidati alla vita monogamica.

Per verificare la correttezza di questa ipotesi, ogni anno abbiamo dedicato una notte a controllare l'identità dei genitori. Quando i piccoli sono già pronti all'involo, la cattura per pochi secondi dei genitori mentre dormono nel nido è un'operazione che non reca disturbo e fornisce una messe di informazioni. Alla luce fioca di una pila veniva controllato se negli anni precedenti era già stato apposto alla zampa un anello di identificazione; in caso contrario si procedeva all'applicazione di un anellino numerato.

È stata una sorpresa constatare che gli adulti dei rondoni pallidi sono fedeli anno dopo anno alla colonia, ma non sempre al partner. Si osserva infatti una certa variabilità: una parte della popolazione è fedele al compagno e al nido occupato l'anno prima, altre coppie restano stabili, ma cambiano nido e una buona percentuale sostituisce sia il nido sia il partner. Nella colonia di Oxford la fedeltà è invece quasi assoluta, ma c'è una spiegazione: data la minore durata della bella stagione, dedicare meno tempo alla ricerca di un compagno significa iniziare prima la deposizione delle uova e quindi riuscire ad allevare con successo più piccoli.

Il comportamento dei fratelli all'interno della stessa nidiata è meno armonico del rapporto collaborativo che abbiamo descritto nei genitori. Le imbeccate giungono con una frequenza media di una ogni ora e i piccoli sono costantemente impegnati nella richiesta di cibo: un atteggiamento rinunciatario sarebbe presto eliminato dalla selezione naturale. Eccoli allora pigolare insistentemente a becco spalancato all'arrivo

VARIAZIONE DEL PESO DELL' UOVO (GRAMMI): +0,2; +0,15; +0,1; +0,05; 0; –0,05; –0,1; –0,15; –0,2. COVATA DI DUE UOVA: 1° UOVO, 2° UOVO. COVATA DI TRE UOVA: 1° UOVO, 2° UOVO, 3° UOVO.

DIVISIONE DELLE IMBECCATE TRA FRATELLI: PRIMO, SECONDO, TERZO.

Quando la covata è di tre uova, il fratello nato per ultimo è svantaggiato rispetto agli altri. Essendo più piccolo - sia perché l'uovo è di dimensioni inferiori sia perché schiude uno o due giorni dopo - il cadetto ottiene una minor percentuale di imbeccate e, in caso di cattivo tempo, ha una maggiore probabilità di morire. Le fotografie mostrano due nidiate di dimensioni normali, per le quali il successo riproduttivo è assicurato.

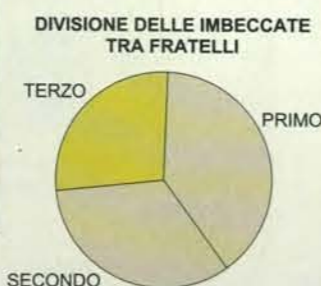
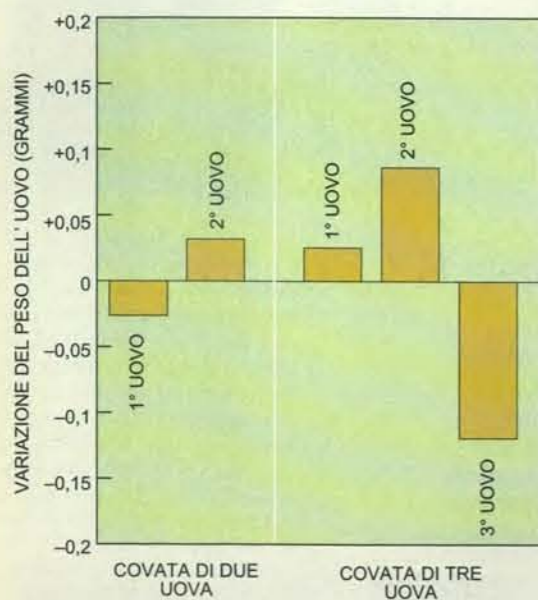



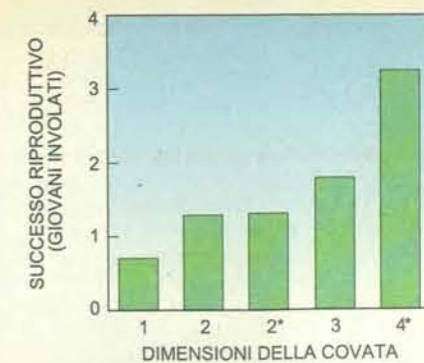
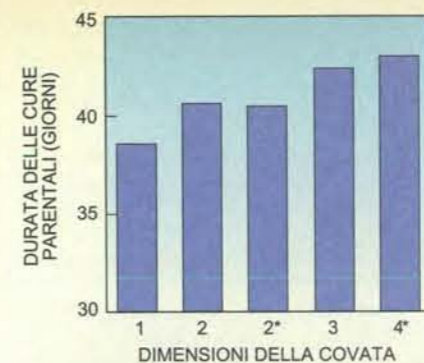
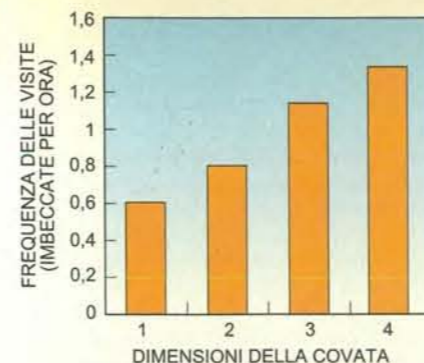
Foto Marco Cucco

L'impegno dei genitori aumenta se il nido contiene un maggior numero di piccoli. Gli adulti devono infatti aumentare la frequenza delle imbeccate e il numero di giorni di allevamento. Il maggior impegno riesce tuttavia ad assicurare il successo riproduttivo, ossia la sopravvivenza dei piccoli fino all'involo. L'attività legata alla riproduzione si protrae per non meno di 11 settimane e per i genitori rappresenta un costo che può essere misurato in termini di perdita di peso. Le settimane più dispendiose sono quelle immediatamente successive alla schiusa, quando gli adulti devono sia scaldare i piccoli ancora nudi sia catturare gli insetti per nutrirli. Come mostra il grafico in basso a destra, in questa situazione, nei nidi con quattro giovani, si osserva la maggiore perdita di peso degli adulti.

Foto Giovanni Boano

del genitore, spostandosi «a spallate» verso il centro del nido, dove con più probabilità il genitore rigurgiterà il cibo. L'ultimo nato deve essere particolarmente competitivo, dato che nasce qualche giorno dopo gli altri e da un uovo lievemente più leggero, ed è quindi il più piccolo. Dalla nostra indagine pluriennale emerge che il terzo (ultimo) pulcino è quello che rischia di più in termini di sopravvivenza.

Lack aveva osservato questo fenomeno di asincronia della schiusa, molto diffuso negli uccelli a prole inetta, e vi aveva attribuito un significato adattativo. Quando depongono le uova, le femmine non possono prevedere quali condizioni climatiche caratterizzeranno il mese successivo, durante l'allevamento dei piccoli; negli anni favorevoli i genitori riusciranno ad allevare tutti i nidiacei, ma in un'annata avversa sarà necessario minimizzare il rischio di completo fallimento costituito dalla morte di tutti i figli. Questo è possibile sacrificando l'ultimo nato, il più piccolo. Indebolito dalla scarsa quantità di cibo, esso diventa presto poco competitivo rispetto ai fratelli più grandi ed è destinato a morire di inedia o calpestato dagli altri nidiacei. Meno bocche da sfamare renderanno più facile il compito dei genitori, che riusciranno così ad allevare gli altri due figli.

L'ipotesi di Lack incontra ancora oggi il favore di massima degli studiosi, anche se, per alcune specie, sono state proposte spiegazioni alternative che hanno trovato a volte una conferma sperimentale.

Quante bocche si possono sfamare?

Utilizzando il nostro sistema automatico di pesatura, siamo stati in grado di studiare come i genitori operino una scelta strategica: alimentare se stessi o allevare la prole. Per capire quale strategia venisse adottata dai rondoni potevamo considerare la normale variazione del cibo disponibile giornalmente come un esperimento già predisposto dalla natura: essendo conosciuta la quantità di insetti nell'aria e le variazioni di peso dei genitori e dei nidiacei, era possibile capire a chi era stato destinato il cibo.

Allo scopo di ottenere dati ancora più significativi siamo intervenuti su alcune nidiate, aumentando o diminuendo il numero di figli da allevare e variando così l'impegno riproduttivo richiesto alle coppie. Alcune nidiate con tre piccoli - la dimensione più comune - sono state aumentate a quattro, altre di conseguenza ridotte a due. I genitori sottoposti al carico riproduttivo maggiore (quattro bocche da sfamare!) hanno reagito aumentando la frequenza delle visite con imbeccata al nido. Anche se ciascuno dei nidiacei ha ricevuto mediamente una quantità di cibo di poco inferiore ai nidiacei di controllo, tutti sono stati allevati con successo fino all'involo. In effetti, alla fine del periodo riproduttivo, i piccoli di nidiate numerose erano solo lievemente più magri (pesavano il 6 per cento in meno rispetto a quelli di nidiate più ridotte) probabilmente perché i genitori avevano aumentato il loro impegno anche dal punto di vista della durata in quanto i loro piccoli aspettavano qualche giorno in più della media a prendere il volo.

Naturalmente tutto ha un prezzo: i genitori con prole più numerosa hanno perso più peso di tutti gli adulti con covate normali, raggiungendo un livello critico di magrezza, soprattutto nel periodo iniziale di massima crescita dei nidiacei. Solamente nella fase finale dell'allevamento, quando la crescita dei nidiacei va rallentando, gli adulti sottoposti all'esperimento hanno potuto recuperare peso, riportandosi su valori di perdita di massa corporea simili ai controlli.

I rondoni pallidi si sono dunque dimostrati buoni genitori perché, a loro spese, hanno fornito una sufficiente quantità di cibo a una prole più numerosa di quella che si riscontra in natura. Questo compito è particolarmente difficile perché sono poche le risorse alimentari altrettanto fluttuanti e instabili quanto il plancton aereo di cui si nutrono rondini e rondoni. Conoscendo giorno per giorno la quantità di insetti disponibili nei dintorni della colonia, è possibile apprezzare con maggiore dettaglio le variazioni di peso di genitori e figli. Il dato sorprendente è la capacità degli adulti sottoposti all'esperimento di fornire cibo sufficiente anche nei giorni in cui i barattoli della trappola a suzione evidenziavano una notevole penuria di insetti. Dovendo fare i conti con la scarsità di cibo, erano i genitori a sacrificarsi e dimagrire.

Risorse e riproduzione

Nei climi temperati la disponibilità di risorse è notevolmente imprevedibile sia nello spazio sia nel tempo (anno dopo anno, giorno dopo giorno) e sempre più viene riconosciuta come un agente selettivo potentissimo, in grado di plasmare molte caratteristiche riproduttive di specie animali e vegetali. Il confronto tra i rondoni studiati a Oxford e a Carmagnola sembra essere eloquente. In tre anni di studio in Inghilterra, Martins e Wright hanno riscontrato una stagione particolarmente avversa, in cui i genitori esausti tornavano al nido con la gola vuota di insetti. In questa situazione i genitori preferivano alimentare se stessi, rinunciando ai figli, e le nidiate con tre piccoli avevano un successo riproduttivo più basso di quelle con due. Nella nostra area di studio invece non si sono mai verificate estati con prolungato maltempo, tanto che anche nelle nidiate con quattro giovani si è sempre osservato il maggior successo di involo. Tuttavia per il rondone pallido allevare una nidiata più grande di quelle naturali è dispendioso in termini energetici; inoltre abbiamo osservato che i piccoli delle nidiate da quattro hanno raggiunto un peso un po' inferiore rispetto agli altri nidiacei e hanno dovuto rimanere qualche giorno di più al nido.

La teoria della *life-history* di David Lack prevede che organismi piccoli e prolifici con alta mortalità siano disposti a investire moltissimo in un singolo episodio riproduttivo (tra gli uccelli questo avviene per esempio nei passeriformi; tra i mammiferi spicca il caso dei marsupiali del genere *Antechinus* che si riproducono una sola volta e poi muoiono), mentre gli animali longevi e poco prolifici (per esempio uccelli marini come le berte e le procellarie che vivono più di 25 anni, o i grossi felini e gli elefanti) preferiscono tutelare la propria sopravvivenza qualora questa sia in conflitto con un evento riproduttivo. Se qualcosa va male, potranno sempre riprovarci nei numerosi anni a venire.

Il nostro rondone pallido sembra collocarsi in una situazione intermedia: se in certe giornate è necessario «premere l'acceleratore» e darsi da fare per aumentare il successo riproduttivo non si tira indietro, anche se il «consumo» energetico aumenta, ma generalmente preferisce tenersi al di sopra del rischio di compromettere la propria sopravvivenza e dunque il futuro successo riproduttivo.

GIORGIO MALACARNE e MARCO CUCCO lavorano entrambi presso il Dipartimento di scienze e tecnologie avanzate dell'Università di Torino ad Alessandria. Malacarne è docente di zoologia ed etologia e svolge ricerche nel campo dell'ecologia comportamentale. Cucco è ricercatore presso questo Dipartimento e si occupa di riproduzione, fisiologia, comportamento e migrazioni degli uccelli.

LACK D., *Ecological Adaptations for Breeding in Birds*, Methuen, Londra, 1968.

MARTINS T.L.F. e WRIGHT J., *Cost of Reproduction and Allocation of Food between Parent and Young in the Swift (*Apus apus*)* in «Behavioural Ecology», 4, 213-223, 1993.

CUCCO M. e MALACARNE G., *Increase of Parental Effort in Experimentally Enlarged Broods of Pallid Swifts* in «Canadian Journal of Zoology», 73, 1387-1395, 1995.

Vedere sott'acqua con il rumore di fondo

Con la visualizzazione in «luce acustica», i suoni che pervadono l'ambiente marino possono illuminare oggetti sommersi, generando immagini a colori in movimento senza l'ausilio del sonar

di Michael J. Buckingham, John R. Potter e Chad L. Epifanio

Il suono metallico dei sonar ci è familiare grazie ai film sulla guerra sottomarina, come *U-Boot 42* o il più recente *Caccia a Ottobre rosso.* La presenza di un bersaglio e la sua posizione possono essere individuati sott'acqua emettendo un segnale acustico e rilevandone l'eco. Oppure si può ascoltare passivamente il suono generato dal bersaglio stesso. In entrambe le tecniche, però, il rumore acustico che permea l'ambiente oceanico compromette l'integrità dei segnali. L'infrangersi delle onde, il passaggio di navi, la pioggia e perfino la presenza di animali marini come i gamberetti possono contribuire a questa «cacofonia» complessiva: un rumore che gli operatori sonar considerano tradizionalmente come un disturbo da eliminare, per quanto possibile.

Tuttavia questo tipo di approccio sta gradualmente cambiando, da quando si è cominciato a riconoscere che il rumore stesso può essere utile. Il rumore circonda ogni oggetto immerso nell'oceano; l'oggetto, a sua volta, modifica questo campo di rumore in un modo che dipende dalla sua forma, composizione e posizione. Il rumore di fondo in ambiente marino ha un analogo ottico nella luce diurna in ambiente subaereo. Noi possiamo vedere e fotografare gli oggetti proprio in quanto essi diffondono, riflettono e modificano la luce. Allo stesso modo, il rumore che permea l'oceano si comporta come una sorta di «luce acustica». Esperimenti recenti hanno infatti mostrato che si possono produrre immagini di oggetti sott'acqua usando il rumore ambiente come sorgente di «illuminazione». I nostri risultati sono abbastanza incoraggianti da farci ritenere che la visualizzazione in luce acustica (*acoustic-daylight imaging*) si potrà rivelare utile per una serie di impieghi, dalla sicurezza dei porti alla individuazione di mine sommerse.

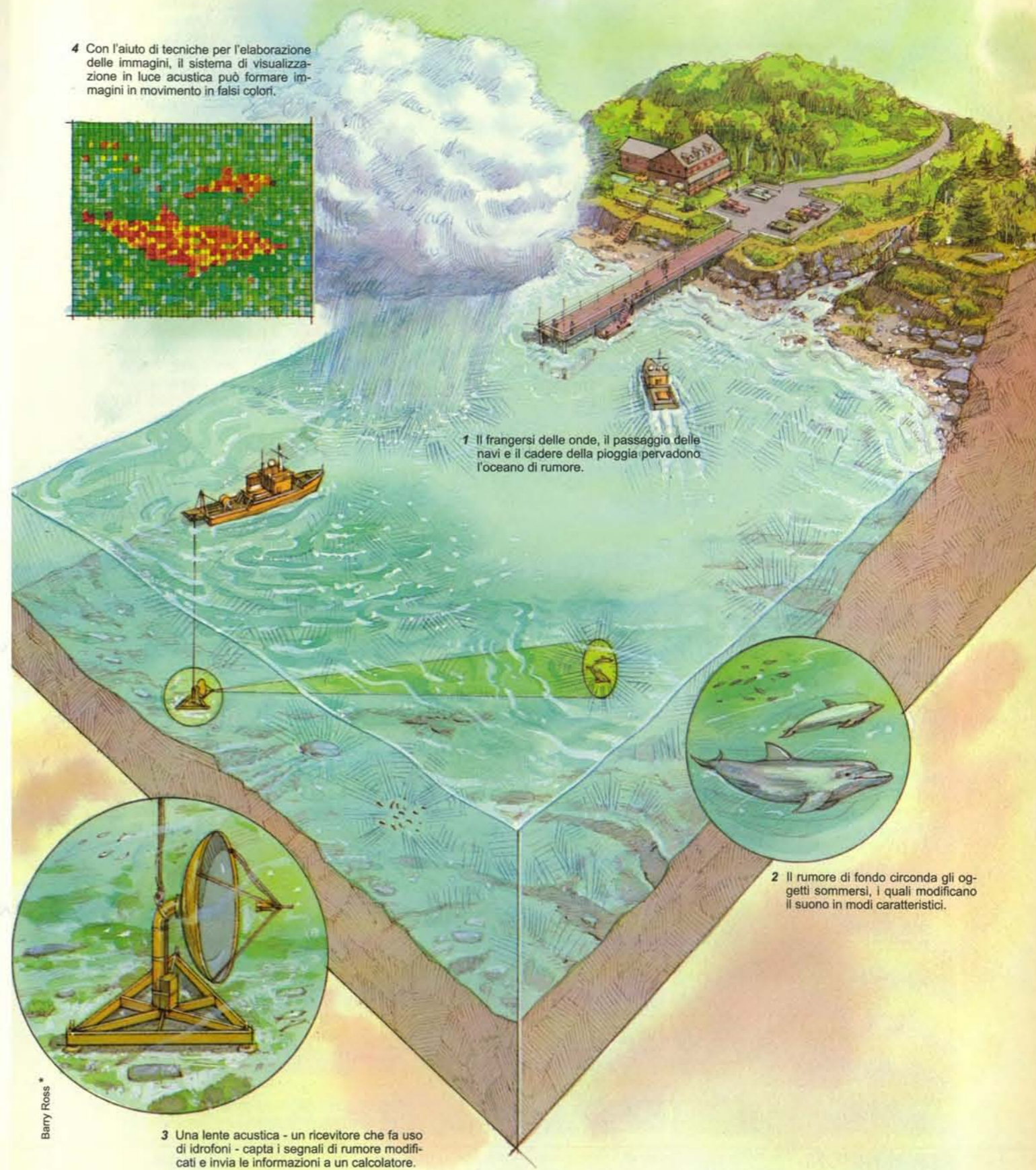
Certo, le immagini finora prodotte non possono dirsi esteticamente preziose. La loro risoluzione non è neppure lontanamente paragonabile con quella ottenuta attraverso la luce. L'acutezza della vista umana deriva dal fatto che la pupilla dilatata è 10 000 volte più grande della lunghezza d'onda della luce visibile, e ciò consente all'occhio di «catturare» un gran numero di onde luminose. Per raggiungere una pari risoluzione utilizzando il suono sarebbe necessario un ricevitore - alquanto ingombrante - del diametro di 600 metri. Ma dal momento che l'acqua di mare assorbe fortemente la luce e tutte le altre frequenze della radiazione elettromagnetica, il suono è comunque diventato il mezzo di elezione - e in molti casi il solo utilizzabile - per acquisire informazioni nelle profondità oceaniche.

L'interesse dell'umanità per il suono nell'oceano risale all'antichità. Aristotele e Plinio il giovane si chiesero se i pesci fossero capaci di udire. I pescatori della Cina antica localizzavano i banchi di pesci usando una canna di bambù come dispositivo per l'ascolto subacqueo, collocandone una delle estremità nell'acqua. Questa idea sarebbe stata in seguito sviluppata da Leonardo da Vinci.

Solo all'inizio del XX secolo vennero realizzati i primi sistemi di localizzazione acustica, allo scopo di contrastare la minaccia costituita dai sottomarini durante la prima guerra mondiale. Pur essendo molto rudimentali, quei primi dispositivi furono alla base di tutti i sonar successivi, il cui sviluppo accelerò rapidamente durante la seconda guerra mondiale. Gli attuali sistemi sonar, che hanno trovato una vasta applicazione in campo militare, commerciale e scientifico, hanno raggiunto un elevato livello di perfezionamento. Eppure molti loro princìpi operativi sono rimasti invariati rispetto a quelli dei modelli di inizio secolo: essi possono emettere attivamente un suono e captare l'eco riflessa da un oggetto, oppure possono ricevere suoni in modo passivo.

Se si considera l'importanza storica delle tecniche sonar attive e passive, non sorprende che la nozione secondo cui il rumore potrebbe offrire un modo completamente nuovo di «vedere» nell'oceano si sia evoluta solo recentemente. Alla metà degli anni ottanta uno di noi (Buckingham) si rese conto che la formazione dell'immagine visiva realizzata dall'occhio non ha carattere né attivo né passivo. L'occhio funziona, cioè, in un modo fondamentalmente diverso dai modi convenzionali in cui si utilizzano le onde acustiche trasmesse in ambiente marino. Una volta concepita questa idea, divenne naturale riflettere sulla possibilità di creare un analogo subacqueo e acustico della formazione dell'immagine visiva. Da un punto di vista pratico, la visualizzazione in luce acustica eviterebbe i principali inconvenienti delle tecniche convenzionali di rilevamento sottomarino: il sonar svela inevitabilmente la presenza dell'operatore, mentre il rilevamento passivo, pur essendo «al coperto», è inefficace con bersagli immobili o silenziosi.

A metà del 1991 eseguimmo i primi esperimenti con luce acustica nell'Oceano Pacifico, non molto al largo di Scripps Pier, presso la Scripps Institution of Oceanography di La Jolla, in California. A Scripps lavorava un giovane tenente di marina, Brodie Berkhout, che realizzò la strumentazione. Il dispositivo principale era un ricevitore acustico costituito da un semplice riflettore parabolico del diametro di 1,2 metri, con un solo idrofono (microfono subacqueo) collocato nel fuoco della parabola. In pratica, questo riflettore fungeva da lente acustica.

La luce acustica in azione

4 Con l'aiuto di tecniche per l'elaborazione delle immagini, il sistema di visualizzazione in luce acustica può formare immagini in movimento in falsi colori.

1 Il frangersi delle onde, il passaggio delle navi e il cadere della pioggia pervadono l'oceano di rumore.

2 Il rumore di fondo circonda gli oggetti sommersi, i quali modificano il suono in modi caratteristici.

3 Una lente acustica - un ricevitore che fa uso di idrofoni - capta i segnali di rumore modificati e invia le informazioni a un calcolatore.

Michael J. Buckingham

Un'orca marina del Sea World Park di San Diego ha fatto da bersaglio mobile nel primo esperimento sul campo di ADONIS, il primo sistema di visualizzazione in luce acustica. Con questo metodo si possono ottenere anche immagini di oggetti in movimento.

Lo scopo dell'esperimento consisteva nel rispondere a una semplice domanda: il livello di rumore captato dal ricevitore cambia quando un oggetto si trova nel suo campo di ascolto? Una tavola di compensato rettangolare rivestita di neoprene (un buon riflettore e diffusore del suono), lunga 90 centimetri e larga 77, fungeva da bersaglio. Scoprimmo che per frequenze comprese tra cinque e 50 chilohertz (quindi entro l'intervallo prodotto dai frangenti delle onde, spesso la principale sorgente di rumore nell'oceano), l'intensità raddoppiava quando il bersaglio era collocato nel campo uditivo del riflettore. Questo risultato si ripeteva spostando il bersaglio da sette a 12 metri di distanza dal ricevitore. Inoltre, il bersaglio rifletteva intensamente alcune frequenze e ne assorbiva altre, un fenomeno che poteva essere interpretato come «colore» acustico. Questo sviluppo suggerì che si potesse tradurre in termini cromatici la luce acustica riflessa, in modo da generare immagini in falsi colori.

Notevolmente incoraggiati da questo successo, pensammo al passo successivo. Il riflettore parabolico con un idrofono nel suo fuoco «guarda» in una sola direzione, corrispondente a un solo pixel dell'immagine. Per creare un'immagine più completa, sono necessari più pixel, cioè più ricevitori (un po' come avviene con l'occhio composto della mosca). Il rumore rilevato da ogni ricevitore può successivamente essere convertito in un pixel con un certo grado di brillanza, in dipendenza dall'intensità del rumore. Come nella fotografia di una pagina di quotidiano, il contrasto tra i pixel permetterebbe all'occhio di interpretare il risultato come una illustrazione più o meno sgranata.

Il successo del primo esperimento ci convinse della possibilità di ottenere vere e proprie immagini in luce acustica, costituite da 100 o più pixel. A metà del 1992 cominciammo a progettare una nuova lente acustica, alla quale demmo poi il nome di ADONIS, per formare immagini attraverso il rumore ambiente. Lavorando assieme alla EDO Acoustics di Salt Lake City, che ha prodotto una schiera ellittica di 128 idrofoni per ADONIS, abbiamo realizzato un riflettore sferico di tre metri di diametro e abbiamo collocato gli idrofoni in corrispondenza del fuoco. Questo sistema, dall'aspetto simile a un'antenna parabolica, forniva un campo visivo di circa sei gradi in orizzontale per cinque in verticale, pari a circa un decimo di quello fornito da un obiettivo fotografico di media focale.

Nell'agosto 1994 abbiamo calato per la prima volta ADONIS sul fondo marino da una delle piattaforme di ricerca della Scripps, *R/P ORB*, ancorata al largo di Point Loma, nel sud della California. Gli oggetti bersaglio erano pannelli quadrati (di un metro di lato) di lamierino di alluminio rivestito con neoprene. I pannelli furono montati in diverse configurazioni su una intelaiatura simile alla griglia del gioco del tris, predisposta sul fondo del mare. L'acqua era resa torbida dall'intenso traffico navale, e la visibilità rimase estremamente ridotta per la maggior parte dell'esperimento. Hélène Vervoort, uno dei nostri sommozzatori, andò addirittura a cozzare contro l'intelaiatura bersaglio.

La parte elettronica del dispositivo, alloggiata in un contenitore metallico a tenuta stagna e pressurizzato, risiedeva a lato dell'asta di sostegno della parabola. Tra gli altri compiti di elaborazione, il dispositivo elettronico progettato dal nostro collega Grant B. Deane, avrebbe dovuto convertire il rumore ambiente acquisito da ADONIS in forma digitale. I dati sarebbero stati poi trasmessi alla superficie e interpretati in tempo reale, restituiti come immagini in falsi colori sullo schermo di un computer.

L'atmosfera di silenziosa trepidazione che permeava il nostro gruppo quando ADONIS fu immerso in mare si dissolse ben presto, ma non a causa di un brillante successo. Quasi subito, infatti, le lancette degli alimentatori di energia collocati a bordo andarono a fondo scala: forte indizio che l'acqua marina si stava infiltrando nel contenitore del dispositivo elettronico. Infatti, quando ADONIS fu portato in superficie e il contenitore metallico fu aperto, ne uscì acqua salata. Quasi meccanicamente, estraemmo i delicati circuiti per lavarli in acqua deionizzata, sebbene nessuno credesse davvero che potessero essere salvati. Ripulimmo il tutto con alcool, testammo ogni componente elettronico del complesso sistema a 128 canali, ne sostituimmo alcuni e provvedemmo a risigillare la fessura della scatola. Ventiquattro ore dopo ADONIS veniva nuovamente calato in mare.

Questa volta, agli ultimi controlli sull'equipaggiamento, la tensione a bordo dell'*ORB* si fece palpabile. Ma quando i dati cominciarono ad affluire, nel laboratorio tornò la calma. Avevamo installato sulla struttura tre pannelli, in modo da formare un semplice bersaglio orizzontale, alto un metro e largo tre, posto a una distanza di 18 metri da ADONIS. Appena ci riunimmo intorno allo schermo, ci accorgemmo che era debolmente visibile una forma rettangolare, che riempiva quasi totalmente lo spazio ellittico riservato all'immagine. Eravamo di fronte alla prima immagine realizzata con luce acustica.

In pochi minuti la nostra fiducia nei confronti del sistema era salita alle stelle. I sommozzatori avevano collocato una sorgente acustica nel centro del bersaglio per aiutarci ad allineare ADONIS con l'intelaiatura bersaglio. Ma la sorgente si rivelò non necessaria: potevamo vedere dove fosse il bersaglio grazie al solo rumore di fondo. Aumentammo allora la distanza tra ADONIS e il bersaglio da 18 a 38 metri, il massimo che potevamo permetterci per non interferire con il traffico navale. Data la maggiore distanza, ci aspettavamo un leggero peggioramento di prestazione, ma sorprendentemente il bersaglio divenne assai più chiaro. Naturalmente, l'immagine era più piccola di quella precedente, ma l'acqua circostante costituiva uno sfondo che faceva risaltare in modo assai netto il bersaglio rettangolare. Dal fatto che queste immagini grezze continuavano a prodursi sullo schermo, rigenerate 30 volte al secondo, potevamo affermare che la formazione di immagini per mezzo di luce acustica era una realtà.

Tuttavia, c'era ancora molto lavoro da svolgere. Volevamo sapere se ADONIS fosse in grado di rivelare oggetti in movimento. Un motore idraulico, montato all'interno dell'albero che sosteneva l'antenna, permetteva di ruotare orizzontalmente il ricevitore parabolico, impiegando circa 12 minuti per effettuare un giro completo. Al ruotare dell'antenna vedemmo il bersaglio apparire su un lato dello schermo, scorrere lentamente verso il centro e finalmente uscire dal lato opposto. Non sussistevano più dubbi sulla possibilità di creare immagini in movimento.

Rimaneva da effettuare un'ultima verifica, la più impegnativa. I sommozzatori sostituirono nella struttura il bersaglio a forma di barra con quattro pannelli, in modo da formare una croce greca avente al centro un foro di un metro quadrato. Si trattava ora di risolvere il foro: alla distanza di 38 metri, le dimensioni del foro sarebbero state molto prossime alla risoluzione limite di ADONIS.

Le prime immagini del bersaglio a forma di croce furono indistinte. Potevamo scorgere la forma della croce, ma il foro centrale fluttuava istante per istante. Abbiamo allora riesaminato i dati e applicato alcune elaborazioni al calcolatore. È emerso che lo spettro del rumore - vale a dire l'intensità del suono alle diverse frequenze - ha una funzione discriminatoria. Si tratta in pratica di una versione acustica del colore. Utilizzando lo spettro, i quattro angoli vuoti e il foro centrale potevano essere facilmente identificati e le estremità dei pannelli localizzate. I pannelli nell'intelaiatura bersaglio mostravano un «colore» distintamente diverso dalle regioni vuote, compreso il foro centrale. Era come se la struttura apparisse «rossa» e il foro «blu». Oggi stiamo esplorando questa tecnica come un mezzo per migliorare le immagini in luce acustica.

Michael J. Buckingham e altri

Un bersaglio a forma di barra è «visto» da ADONIS come una forma allungata e artificialmente colorata in rosso (*a sinistra*). Ogni pixel rappresenta il segnale rilevato da un idrofono. L'elaborazione al calcolatore intensifica poi l'immagine.

Nuovi impieghi per il rumore

La visualizzazione in luce acustica è solo un aspetto della tecnologia di telerilevamento basata sul rumore di fondo in ambiente marino. Gli oceanografi hanno recentemente suggerito altri esempi di tecniche simili. Una consiste nell'utilizzare il rumore ambiente per determinare le proprietà acustiche del fondo marino e risalire quindi alla sua composizione. In corrispondenza delle piattaforme continentali, dove la profondità è inferiore ai 200 metri, il rumore si riflette sul fondo marino. Il modo in cui il suono viene rinviato dipende dalla velocità con cui le onde acustiche si muovono nel fondo e quindi dalla natura del materiale: per esempio roccia coerente o sabbia.

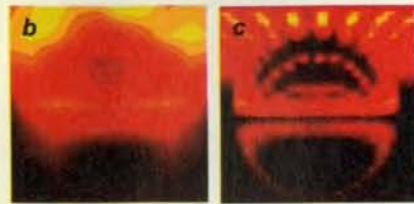
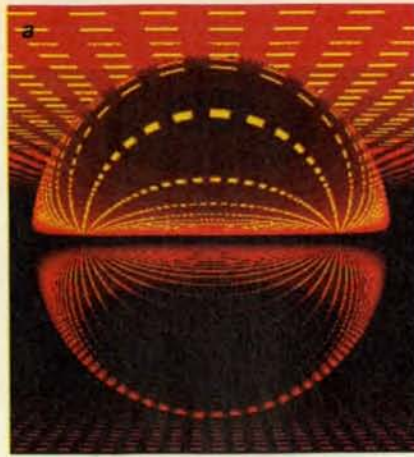
Per realizzare queste misurazioni, si possono impiegare idrofoni sospesi a boe che tracciano una mappa del fondo marino sfruttando il rumore ambiente. Si spera che questa tecnica possa offrire un'alternativa economicamente conveniente ai metodi convenzionali, come la spesso lenta e laboriosa pratica che consiste nel far rimbalzare segnali sonar sul fondo marino.

I rumori di fondo possono anche risultare utili nello studio di processi che si verificano sulla superficie marina. In particolare, possono rivelare la quantità di gas atmosferico assorbito dagli oceani. Cruciale per i modelli del riscaldamento globale e dell'effetto serra, l'entità dello scambio gassoso è difficile da quantificare. Il rumore ambiente può aiutare, perché il fenomeno maggiormente responsabile del rumore, il frangersi delle onde, ha anche un ruolo importante nel trasferimento di gas dall'atmosfera al mare. Trascinando il gas nell'acqua, il processo crea uno strato di bolle immediatamente al di sotto della superficie. Le bolle modificano in modo caratteristico il rumore dei frangenti, lasciando un tipico «marchio» acustico che può essere rilevato da idrofoni situati un poco più in profondità.

Da una misurazione acustica così semplice si potrebbe ricavare la quantità di aria nello strato di bolle e la profondità fino a cui le bolle giungono. Entrambi questi valori sono in relazione con la quantità di gas che entra nell'oceano. Alcune prove preliminari suggeriscono che l'idea è realizzabile in pratica, tanto che sono attualmente in fase di realizzazione già diversi importanti esperimenti con questo scopo.

Barry Ross

Il rumore potrebbe consentire la misurazione delle caratteristiche acustiche del fondo oceanico (*a sinistra*) o della quantità di gas assorbita dal mare (*a destra*).

I bersagli statici ci sono serviti per dimostrare che la formazione di immagini in luce acustica era fattibile. Spronati dai buoni risultati, eravamo ansiosi di misurarci con un bersaglio più difficile: l'orca (*Orcinus orca*). Grazie ai buoni uffici di Ann Bowles, biologa presso l'Hubbs Sea World Research Institute di San Diego, fummo invitati a mettere ADONIS nella vasca del parco marino che ospitava l'orca. Noi avremmo potuto provare a ottenere immagini in luce acustica di un mammifero marino assai mobile, mentre la Bowles avrebbe potuto studiare il comportamen-

John R. Potter

Le immagini simulate di una sfera di acciaio lasciano intendere quali siano le aspettative riposte nella visualizzazione in luce acustica. Il rumore ambiente è originato dal frangersi delle onde, rappresentato dai trattini gialli. Un sistema con 90 000 pixel produrrebbe la risoluzione più alta (*a*) ma probabilmente si rivelerebbe poco pratico. La tecnologia attuale usa circa 100 pixel (*b*), ma sono stati progettati sistemi con 900 pixel.

to degli animali in presenza di un oggetto estraneo nella «loro» vasca; pare infatti che questi cetacei tendano a sentire come proprio qualunque oggetto si trovi all'interno della loro vasca. Nel febbraio 1995, lavorando tra una esibizione e l'altra delle orche, disponemmo ADONIS in un angolo della vasca in condizioni meteorologiche piuttosto spiacevoli. Vi fu pioggia battente per la maggior parte del tempo; per proteggere i nostri calcolatori e gli strumenti di registrazione stendemmo un telone impermeabile di fortuna, ma anche così l'acqua filtrava per ogni dove.

Nel frattempo, mentre allestivamo il sistema, le orche nuotavano liberamente nella vasca, interessandosi a noi almeno quanto noi ci interessavamo a loro. All'inizio circospette, si abituarono rapidamente alla grande antenna riflettente. Anzi, si dimostrarono incuriosite dall'effetto di focalizzazione della parabola: quando le orche provocavano un suono secco questo veniva intensamente riflesso verso di loro. Un giovane maschio, Splash, fu il più coraggioso, afferrando con la bocca uno dei collegamenti elettronici e tentando di masticarlo. Un altro animale nuotò velocemente verso l'antenna tentando di avventarsi contro di essa. Fu così che gli ammaestratori decisero di spostare le orche in un'altra vasca, dove poterono giocare a loro piacimento finché noi non fummo pronti.

Dopo una falsa partenza, accendemmo nuovamente la strumentazione e i dati cominciarono ad affluire. Non sapevamo bene che cosa aspettarci. Pompe e altri macchinari fecero crescere il rumore nelle vasche del parco marino, portandolo a livelli alti, paragonabili a quelli tipici dell'ambiente oceanico. Nonostante alcuni danni minori subiti dal dispositivo elettronico per essere stato raggiunto dall'acqua salata, i segnali furono ricevuti da tutti i 128 canali, tranne due, e mostrati in tempo reale come immagini in movimento.

Appena guardammo i dati grezzi (senza cioè intensificazione dell'immagine) sullo schermo, apparve improvvisamente una forma indistinta che rimase visibile per alcuni secondi. Contemporaneamente, potevamo osservare direttamente una delle orche mentre si muoveva nel campo visivo di ADONIS, dove rimase per qualche momento prima di allontanarsi decisamente dal riflettore parabolico. I monitor degli idrofoni e gli ammaestratori confermarono che le orche non stavano emettendo suoni, e ciò implicava che le immagini da noi ottenute erano un diretto risultato della luce acustica. Per poter dire di avere davvero realizzato immagini delle orche in movimento in luce acustica dobbiamo ancora esaminare con cura i dati e correlarli con le registrazioni video realizzate durante l'esperimento. Tuttavia le osservazioni preliminari e l'esperimento *ORB* al largo di Point Loma permettono di affermare l'esistenza di un'analogia tra la fotografia e la realizzazione di immagini subacquee per mezzo del rumore ambiente.

I risultati ottenuti hanno immediatamente suggerito numerose applicazioni potenziali. Una di queste è la ricerca di mine subacquee: alcuni tipi di mine possono infatti essere progettati in modo da detonare alla ricezione di un segnale sonar. Un sistema di rilevamento in luce acustica potrebbe però localizzare questi dispositivi senza provocarne l'esplosione. La visualizzazione per mezzo del rumore ambiente potrebbe inoltre costituire un sistema di visione per veicoli subacquei autonomi, mettendoli in grado di aggirare un ostacolo senza essere indirizzati da un operatore umano in superficie e di tenere sotto controllo l'integrità strutturale di impianti per la perforazione petrolifera o di altre grandi piattaforme marine. Per la sua natura silenziosa, questa tecnica sarebbe infine assai idonea per la sorveglianza dei porti e per il conteggio dei mammiferi marini, dal momento che non vi sarebbe interferenza acustica con gli animali stessi.

Presumibilmente le possibilità della visualizzazione in luce acustica si potranno spingere molto più in là, considerato che il concetto di base di questa tecnica è assai giovane. In prove recenti, ADONIS ha prodotto immagini di galleggianti in plastica, sfere di titanio, barili per petrolio in cloruro di polivinile contenenti sabbia bagnata e gommapiuma. Le analisi preliminari indicano che i barili si possono vedere anche quando si trovano sul fondo marino. Lo sviluppo della tecnica che finora siamo riusciti a conseguire è paragonabile ai primordi della televisione: in questi casi non è tanto importante la qualità dell'immagine, quanto il fatto che l'immagine ci sia. Nei mesi a venire, contiamo di rimpiazzare il riflettore sferico con una schiera in fase contenente un migliaio di idrofoni. Al tempo stesso, svilupperemo algoritmi che provvederanno all'amplificazione dell'immagine e al suo riconoscimento automatico. Questi sforzi - ci auguriamo - miglioreranno significativamente la qualità delle immagini in luce acustica e forse faranno dei successori di ADONIS le videocamere subacquee del futuro.

MICHAEL J. BUCKINGHAM, JOHN R. POTTER e CHAD L. EPIFANIO hanno sviluppato la tecnica di visualizzazione in luce acustica alla Scripps Institution of Oceanography di La Jolla, in California. Buckingham, laureatosi in fisica all'Università di Reading, è professore di acustica oceanica in quella sede, ed è visiting professor all'Università di Southampton, in Inghilterra. Potter, che è un navigatore itinerante, dirige attualmente l'Acoustic Research Laboratory della National University of Singapore. È stato insignito di titolo accademico dal Council for National Academic Awards e dall'Università di Cambridge. Epifanio è prossimo a laurearsi a Scripps, proprio in materia di visualizzazione in luce acustica.

BUCKINGHAM MICHAEL J., BERKHOUT BRODERICK V. e GLEGG STEWART A. L., *Imaging the Ocean with Ambient Noise* in «Nature», 356, 26 marzo 1992.

BUCKINGHAM MICHAEL J., *Theory of Acoustic Imaging in the Ocean with Ambient Noise* in «Journal of Computational Acoustics», 1, n. 1, marzo 1993.

POTTER JOHN R., *Acoustic Imaging Using Ambient Noise: Some Theory and Simulation Results* in «Journal of the Acoustical Society of America», 95, n. 1, gennaio 1994.

BUCKINGHAM MICHAEL J. e POTTER JOHN R., *Acoustic Daylight Imaging: Vision in the Ocean* in «GSA Today», 4, n. 4, aprile 1994.

L'ANGOLO MATEMATICO

di Ian Stewart

Prova d'acquisto su Internet

Supponiamo che vogliate fare un acquisto su Internet usando la vostra carta di credito. Se trasmettete il numero della carta a un commerciante, qualcuno può intercettarlo e usarlo per sé. Allo stesso modo, anche il numero d'identificazione personale - il NIP - può essere trafugato. Per evitare questi problemi, molti sistemi di rete adottano metodi di cifratura per codificare, o rimescolare, i messaggi riservati. Ammesso che nessuno riesca a violare il codice, il messaggio cifrato rimane sicuro. Ma su Internet questo non è sufficiente. Per quanto esistano numerosi codici sicuri, gli utenti vogliono essere certi che nessuno possa accedere a informazioni confidenziali. Il modo migliore per non rendere pubblico un messaggio è quello di non inviarlo; la cosa sorprendente è che i cosiddetti protocolli a conoscenza zero consentono di agire proprio in questo modo.

Il metodo consente di convincere qualcuno, per esempio una funzionaria di banca, che si ha un'informazione importante, come un NIP, senza in realtà rivelare l'informazione stessa. La migliore esemplificazione del principio che sottende i protocolli a conoscenza zero è data dai problemi di colorazione delle mappe. Nel 1852 Francis Guthrie, allora specializzando allo University College di Londra, propose il cosiddetto teorema dei quattro colori, secondo cui bastano quattro colori per colorare ogni mappa bidimensionale in modo che due regioni adiacenti non abbiano mai lo stesso colore. Più di un secolo dopo, nel 1976, il teorema venne dimostrato da Kenneth Appel e Wolfgang Haken, dell'Università dell'Illinois.

Con meno di quattro colori, solo alcune mappe possono essere colorate in modo che regioni adiacenti siano di tinta diversa. Supponiamo che la funzionaria di banca vi invii una mappa complessa e che intendiate convincerla - senza fargliela vedere - che siete in grado di colorarla usando tre colori. Immaginiamo poi che abbiate costruito un congegno elettronico collegato a due schermi sensibili al tocco, uno situato nella banca e uno a casa vostra (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Innanzitutto programmate nella macchina la vostra colorazione della mappa, per esempio toccando determinate regioni dello schermo: un tocco per il rosso, due per il blu e tre per il giallo. Successivamente la funzionaria sceglie un confine fra due regioni; la macchina modifica il vostro schema di colorazione, magari rendendo blu tutte le aree rosse, rosse le aree blu e lasciando immutate quelle gialle. Lo schermo della funzionaria mostra i nuovi colori delle regioni che hanno in comune il confine prescelto: se la colorazione originale era valida, allora questi due colori sono differenti.

Ripetendo l'operazione per ciascun confine, la funzionaria può stabilire se avete effettivamente una mappa a tre colori: se la colorazione originale non era valida e due regioni adiacenti avevano lo stesso colore, allora, quando la funzionaria sceglie il confine che le separa, trova che anche i colori modificati sono identici. Se invece i colori permutati sono diversi a ogni confine, la mappa originale era valida. Dato che la macchina sceglie a caso una delle sei possibili permutazioni dei colori, la funzionaria non può dedurre la colorazione originale: può solo confermare che era corretta.

Un protocollo a conoscenza zero fa sì che il cliente della banca possa convincere la funzionaria di essere in grado di colorare una mappa a tre colori. Per averne la prova, la funzionaria deve solo controllare che a ciascun confine i colori siano diversi.

Gli esperti di protocolli a conoscenza zero preferiscono un ragionamento più rigoroso, fondato su un processo di «simulazione». Immaginiamo un sistema contraffatto che scelga colori diversi a caso invece di permutare le vostre scelte. Questo sistema potrebbe generare numerose successioni diverse di coppie di colori, una delle quali sarà la successione di risposte fondata sulla vostra mappa. Supponiamo che la funzionaria di banca possa individuare la vostra mappa a partire dalle risposte fornite dal sistema vero. In tal caso potrebbe anche individuare la vostra mappa nelle rare occasioni in cui il sistema contraffatto producesse quelle stesse risposte. Ma per il sistema contraffatto la vostra mappa non esiste, e quindi quella deduzione è impossibile. Se la funzionaria non può dedurre la colorazione che avete scelto dalle risposte della macchina, nessun altro può farlo.

Un protocollo a conoscenza zero più elaborato permette di convincere la funzionaria che conoscete due fattori primi, diciamo p e q, di un certo numero n. Se n è abbastanza grande - per esempio di 200 cifre - non si conosce alcun algoritmo in grado di trovare i suoi fattori in un tempo compatibile con la durata dell'universo. Ma esistono algoritmi per verificare se i fattori p e q sono primi. La funzionaria, allora, può scegliere due numeri primi, trovare il loro prodotto e trattare i numeri primi come un NIP, che vi viene fornito al momento dell'apertura di un conto. Usando un canale di comunicazione adeguato, potreste convincerla che conoscete il NIP senza divulgare i numeri primi né a lei né a nessun altro.

Per canale di comunicazione adeguato intendo un canale «a trasferimento cieco», che consente di inviare alla funzionaria di banca due elementi di informazione in modo che possa leggerne solo uno. Voi ignorate quale dei due elementi lei possa leggere. Si può costruire un canale a trasferimento cieco utilizzando la teoria dei numeri. Il metodo richiede l'uso di due numeri di 100 cifre invece del solito NIP a quattro cifre. Esistono certamente strategie più pratiche, ma sono molto difficili da descrivere.

Due secoli fa Carl Friedrich Gauss, fondatore della teoria dei numeri, definì il nuovo campo di studi «regina della matematica». Le regine, si sa, sono soprattutto decorative, e questa sfumatura non sfuggì a Gauss. Ancora solo 20 anni fa la teoria dei numeri era considerata la branca della matematica di minor valore pratico: pensiero puro da torre d'avorio, bello ma inutile.

Oggi la teoria dei numeri si è fatta strada nel mondo del commercio, grazie ai calcolatori e ai sistemi di comunicazione. L'informazione digitale non è altro che numeri resi reali. Quindi i processi che si realizzano attraverso l'informazione digitale sono quasi inevitabilmente applicazioni della teoria dei numeri. I metodi di protezione a conoscenza zero e i protocolli di trasferimento cieco sono solo due delle idee curiose nate dalle profondità della teoria dei numeri. In quanto scienza applicata, la teoria dei numeri ha stentato ad accendersi, ma ora le sue scintille volano sempre più in alto.

Un esempio di trasferimento cieco

Voi e la funzionaria di banca conoscete due numeri primi, p e q, e il loro prodotto, n. Una fonte indipendente, di vostra fiducia, dà a entrambi una successione di cifre binarie, da cui potete costruire tutti i numeri casuali richiesti dal protocollo. Per convincere la funzionaria che conoscete p e q, procedete così:

1. La fonte indipendente genera un intero x casuale e invia a voi e alla funzionaria il resto r, ottenuto dividendo x^2 per n (vale a dire, $r = x^2$ modulo n).
2. Secondo la teoria dei numeri, r ha quattro radici quadrate in modulo n, che trovate conoscendo p e q. Una è x e le altre tre sono $n - x$, y e $n - y$, per un certo y. (Se non conoscete p e q, non esiste alcun algoritmo per trovare queste radici quadrate; conoscendole tutte e quattro, invece, è facile dedurre p e q.)
3. Scegliete a caso uno di questi quattro numeri, che chiameremo z.
4. Scegliete a caso un intero k e inviate alla funzionaria l'intero $s = k^2$ modulo n. Calcolate poi due numeri, a e b, tali che $a = k$ modulo n, e $b = kz^2$ modulo n. Inviate a e b alla funzionaria di banca tramite trasferimento cieco.
5. La funzionaria può leggere esattamente uno dei due messaggi. Controlla che il suo quadrato modulo n sia s (se legge il messaggio a) o rs (se legge b).
6. Si ripetono questi passaggi T volte. Alla fine, la funzionaria sa con probabilità $1 - 2^{-T}$ che voi conoscete la scomposizione in fattori.

Si noti che non vi è alcuna comunicazione di ritorno dalla funzionaria a voi: il protocollo non è interattivo.